

**Evaporação Forçada de Lixiviados de Aterro Sanitário: Uma
Análise das Pesquisas Desenvolvidas no Âmbito Nacional e
Internacional**

Juliana Maria dos Santos

Orientadora: Msc. Débora Machado de Oliveira

2011/1



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**EVAPORAÇÃO FORÇADA DE LIXIVIADOS DE ATERRO
SANITÁRIO: UMA ANÁLISE DAS PESQUISAS
DESENVOLVIDAS NO ÂMBITO NACIONAL E
INTERNACIONAL**

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa
Catarina para a Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.**

JULIANA MARIA DOS SANTOS

**Orientador
Msc. Débora Machado de Oliveira**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**EVAPORAÇÃO FORÇADA DE LIXIVIADOS DE
ATERRO SANITÁRIO: UMA ANÁLISE DAS
PESQUISAS DESENVOLVIDAS NO ÂMBITO
NACIONAL E INTERNACIONAL**

JULIANA MARIA DOS SANTOS

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte
dos requisitos para a Conclusão de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental - TCCII**



Msc. Débora Machado de Oliveira
(Orientador)



Dra. Elvete Prim
(Membro da Banca)



Mestranda Heloísa Alves Pereira dos Santos
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2011**

Santos, Juliana

Evaporação Forçada de Lixiviados de Aterro Sanitário: Uma Análise das Pesquisas Desenvolvidas no Âmbito Nacional e Internacional

Juliana Maria dos Santos-Florianópolis, 2011.114f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Título em Inglês: Forced evaporation of landfill leachates: an analysis of the developed researches at national and international ambits

1. Evaporação forçada. 2.Lixiviados. 3. Parametros ambientais

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me conceder a força de vontade e a capacidade para desenvolver esse trabalho e chegar ao fim dessa árdua jornada.

Em segundo lugar agradeço especialmente a minha querida mãe, meu grande exemplo de perseverança, esforço, amor e força, que ao longo dessa jornada esteve sempre presente e nos momentos mais difíceis sempre me ofereceu a sua imprescindível ajuda, conforto e o seu consolo.

Agradeço também a minha avó e aos meus familiares que compreenderam a minha ausência ao longo desses cinco anos e principalmente durante os últimos meses.

Agradeço especialmente ao Renan Carneiro por toda a ajuda e pelo apoio dado durante o desenvolvimento desse trabalho; sua ajuda foi, como sempre, fundamental e imprescindível.

Agradecimentos indispensáveis faço também às minhas companheiras e especiais amigas de faculdade, Cristina Lalau, Graziela Copetti, Marta Penno e Amanda Stiz, levarei a amizade de vocês para a vida toda e sempre me lembrarei das boas risadas que demos juntas nos momentos mais difíceis.

À Débora Machado por ter aceitado me orientar durante essa pesquisa, e por sempre estar disposta a encontrar uma solução para todas as dificuldades encontradas ao longo deste trabalho.

À Iracema Maia por todas as conversas, amizade e as correções feitas durante a primeira versão deste trabalho.

Por fim agradeço a todas as pessoas direta ou indiretamente envolvidas nessa árdua jornada, ainda que eventualmente cometa eu a injustiça de não tê-las citado nesses agradecimentos, não obstante tenham também contribuído para minha formação pessoal e profissional e, portanto, tenham sido essenciais em minha vida.

Resumo

SANTOS, J. M. Evaporação Forçada de Lixiviados de Aterro Sanitário: Uma Análise das Pesquisas Desenvolvidas no Âmbito Nacional e Internacional. Florianópolis, 2010, 114p. Trabalho de Conclusão de Curso-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Foram compiladas e analisadas 12 publicações, 9 de caráter internacional e 3 de caráter nacional, tratando do tratamento de lixiviados de aterros sanitários através do uso da tecnologia de evaporação forçada. O pH foi o parâmetro mais expressivo e de maior influência durante os ensaios de evaporação relatados pelos autores em seus trabalhos, sendo responsável diretamente pela emissão de poluentes gasosos na forma de amônia e ácidos orgânicos para a atmosfera. Uma comparação dos principais parâmetros e aspectos e maior importância citados pelos autores em seus trabalhos foi desenvolvida para avaliar a viabilidade do uso desta técnica de tratamento. De forma ampla. Isoladamente ou sem tratamento prévio a evaporação forçada de lixiviados de aterros sanitários não pode ser considerada como uma forma segura de tratamento sem que o controle das emissões gasosas seja feito.

PALAVRAS-CHAVE: Evaporação Forçada, Lixiviados, Parâmetros Ambientais.

Abstract

SANTOS, J. M. Forced evaporation of landfill leachates: an analysis of the developed researches at national and international ambits. Florianópolis, 2010, 114p. Trabalho de Conclusão de Curso-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Twelve publications have been compiled and analyzed, being nine of them of international character, and three of national character, dealing with the treatment of landfill leachate through the use of forced evaporation technology. The pH value was the most significant parameter and the most influential during the evaporation tests reported by the authors in their works, being directly responsible for the emission of gaseous pollutants into the atmosphere, such as ammonia and organic acids. A comparison of the main parameters and the most important aspects, mentioned by the authors in their works has been undertaken to assess the feasibility of broadly using this treatment technique. Singly or without prior treatment, a forced evaporation of landfill leachate cannot be regarded as a safe treatment, unless the control of gaseous emissions is done.

Key words: Forced Evaporation, Leachate, Environmental Parameters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo Geral.....	2
2.1.1. Objetivos Específicos.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1. Lixiviados de aterros sanitários.....	2
3.2. Mecanismos de degradação de resíduos	4
3.3. Caracterização e estimativa da produção de lixiviados	7
3.4. Técnicas de tratamento de Lixiviados.....	10
3.4.1. Recirculação e tratamento conjugado de lixiviados	11
3.4.2. Tratamento biológico	11
3.4.3. Tratamento físico-químico	12
3.4.4. Evaporação de lixiviados	13
4. METODOLOGIA	15
5. RESULTADOS.....	15
5.1. Modelo de evaporação semi-contínua para a avaliação do processo de tratamento de lixiviados, Marks et al., 1994.....	15
5.1.1. Resultados e Discussões apresentados por Marks et al.,1994. .	17
5.2. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários (Birchler et al., 1994)	22
5.2.1. Resultados obtidos por Birchler et al,1994	24
5.2.2. Considerações Finais por Birchler et al .,1994.....	35
5.3. Tratamento de lixiviado de aterro industrial, por meio da evaporação e da osmose reversa (Di Palma et al., 2002).....	36
5.3.1. Resultados obtidos por Di Palma et al, 2002	37
5.3.2. Considerações finais apresentadas por Di Palma et al., 2002 ..	40
5.4. Tratamento combinado de lixiviados por processos de membrana e evaporação forçada, Giust e Del Piccolo, 2007	40
5.4.1. Resultados e Discussões Obtidos por Giust e Del Piccolo, 2007	40
5.4.2. Resultados alcançados por Giust e Del Piccolo, 2007	44
5.4.3. Considerações Finais por Gisut e Del Piccolo, 2007	45
5.5. Tratamento por evaporação de lixiviado em escala piloto , Ettala, 1998.	45
5.5.1. Resultados e Discussões apresentados por Ettala, 1998.....	47
5.5.2. Resultados e Discussões apresentados por Ettala, 1998.....	49
5.6. Processos de tratamento combinados de ultra filtração e evaporação, Xu, Yue e Nie, 2006.....	49
5.6.1. Metodologia utilizada por Xu et al., 2006.....	50
5.6.2. Resultados e Discussões apresentados por Xu et al. 2006	51

5.7. Testes de evaporações para desenvolvimento de um sistema de evaporação por combustão submersa, Yue et al., 2007.....	53
5.7.1. Metodologia utilizada por Yue et al., 2007	53
5.7.2. Resultados e discussões apresentadas por Yue et al. 2007	55
5.8. Evaporação e coogeração de Energia, Hercule et al., 2005	62
5.8.1. Metodologia utilizadas nos trabalhos desenvolvidos por Hercule et al., 2005	65
5.8.2. Considerações Finais apontadas por Hercule et al., 2005	70
5.9. Monitoramento de parâmetros ambientais na evaporação de Chorume, Vignoli e Aguiar (2007).....	70
5.9.1. Conclusões obtidas ao final do trabalho de Vignoli e Aguiar (2007)	73
5.10. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários utilizando um evaporador unitário, Bacelar et al, 2008.....	73
5.11. Avaliação da qualidade do efluente resultante da evaporação/destilação, Haddad, 2009.....	81
5.11.1. Metodologia utilizada durante a realização dos trabalhos desenvolvidos por Haddad , 2009	82
5.11.2. Resultados e Discussões.....	85
5.11.3. Considerações finais.....	97
5.12. Estudo da evaporação como alternativa tecnológica para tratamento de lixiviados de aterros sanitários, Bahe, 2008	98
5.12.1. Resultados encontrados por Bahe, 2008.....	101
5.12.2. Considerações Finais.....	105
6. DISCUSSÃO	106
7. RECOMENDAÇÕES	108
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma do processo de decomposição dos resíduos sólidos no aterro sanitário.	6
Figura 3.2 - Fases de estabilização de percolados em aterros sanitários.....	7
Figura 5.1 - Esquema da evaporação tipo "flash" um estágio. 16	
Figura 5.2 - Concentração de Amônia e Ácido Acético no destilado	18
Figura 5.3 - Aparato I Utilizado por Birchler et al, 1994.....	24
Figura 5.4 - Evaporador piloto instalado na Bavária – Alemanha	29
Figura 5.5 - Modelo esquemático do Evaporador Suíço	31
Figura 5.6 - Separação da amônia e ácidos orgânicos (temperatura = 60°C e 100°C)	32
Figura 5.7 - COT e Volume do destilado em função do tempo (P=400 mmHg).....	38
Figura 5.8 - COT e Volume do destilado em função do tempo (P=20 mmHg).....	38
Figura 5.9 - Sistema de evaporação utilizado por Giust et al., 2007	42
Figura 5.10 - Sentido do fluxo e unidades componentes do sistema de evaporação	43
Figura 5.11 - Diagrama Simplifica do Evaporador utilizado por Ettala, 1998.....	46
Figura 5.12 - Esquema do evaporador em planta, utilizado por Ettala,1998.....	47
Figura 5.13 - Aparato experimental de evaporação	54
Figura 5.14 - Compostos presentes no lixiviado bruto.....	56
Figura 5.15 - Variação da DQO no Condensado em função da taxa de evaporação (Pressão de 1 atm).....	56
Figura 5.16 - Taxa de DQO em Função da taxa de Evaporação (Pressão de 1 atm)	57
Figura 5.17 - Variação da DQO no Condensado em função da taxa de evaporação (Evaporação a Vácuo)	58

Figura 5.18 - Taxa de DQO em Função da taxa de Evaporação (Evaporação a Vácuo)	59
Figura 5.19 - Variação da DQO no Condensado em função da taxa de evaporação (Evaporação com arraste de ar)	59
Figura 5.20 - Taxa de DQO em Função da taxa de evaporação	60
Figura 5.21 - Diagrama esquemático do processo por evaporação submersa em dois estágios.	61
Figura 5.22 - Concentração de amônia e DQO em lixiviado bruto	64
Figura 5.23 - Esquema do Tratamento Adotado	65
Figura 5.24 - Esquema do evaporador utilizado no segundo estágio.....	67
Figura 5.25 - Evaporador Unitário localizado no aterro de Gramacho	74
Figura 5.26 - Experimento de evaporação do lixiviado em bancada.....	79
Figura 5.27 - Representação esquemática do aparato experimental:.....	83
Figura 5.28 - Variação da DQO [mgDQO.L-1] presente no lixiviado condensado e concentrado em função do volume evaporado [%], com e sem acidificação prévia.....	92
Figura 5.29 - Variação de N-NH ₃ [mgN-NH ₃ .L-1] presente no lixiviado condensado e concentrado em função do volume evaporado [%], com e sem acidificação prévia.....	93
Figura 5.30 - Variação de Cl- [mgCl.L-1] presente no lixiviado condensado e concentrado em função do volume evaporado [%], com e sem acidificação prévia.	94
Figura 5.31 - Vidrarias e equipamentos utilizados na evaporação de lixiviado.....	98
Figura 5.32 Evaporação de lixiviado Bruto	100
Figura 5.33 Evaporação de lixiviado acidificado.....	100
Figura 5.34 - Caracterização dos sólidos presentes no chorume do Aterro de Gramacho	101

Figura 5.35 -Aspecto das amostras de chorume, resíduo e vapores condensados	104
---	-----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição dos lixiviados reportados da literatura	9
Tabela 5.1 - Características do lixiviado de aterro sanitário ...	17
Tabela 5.2 - Concentrações para evaporação flash, duas fases quatro estágios utilizando lixiviados de Delaware, EUA (concentrado) -	21
Tabela 5.3 - Concentrações para evaporação flash,duas fases quatro estágios utilizando lixiviados da Pensilvânia, EUA (concentrado).....	22
Tabela 5.4 - Concentrações para evaporação flash,duas fases quatro estágios utilizando lixiviados de Delaware,EUA (Destilado).....	22
Tabela 5.5 - Métodos Analíticos Utilizados por Birchler, 1994	23
Tabela 5.6 - Qualidade dos destilados e concentrados obtidos	27
Tabela 5.7 - Resultados das evaporação com Evaporador Suíço	30
Tabela 5.8 - Estimativa das diferenças na qualidade do destilado de acordo com o pH.....	33
Tabela 5.9 - Caracterização dos lixiviados Fracos	34
Tabela 5.10 - Caracterização do Lixiviado Bruto	37
Tabela 5.11 - Caracterização do Destilado e do Concentrado	39
Tabela 5.12 - Composição do lixiviado bruto: aterro antigo...	40
Tabela 5.13 - Caracterização dos lixiviados novos	41
Tabela 5.14 - Custos operacionais dos sistemas utilizados estudados por Giust e Del Piccolo, 2007.....	45
Tabela 5.15 - Caracterização do lixiviado no sistema de evaporação -	48
Tabela 5.16 - Custos detalhados do evaporador utilizado por Ettala, 1997.....	49
Tabela 5.17 - Composição do concentrado de evaporação	52
Tabela 5.18 - Composição do lixiviado bruto utilizado nos experimentos	55

Tabela 5.19 - Dados operacionais do evaporador submerso em duas.....	61
Tabela 5.20 - Composição do lixiviado bruto	62
Tabela 5.21 - Características e limites de lançamentos de efluentes em rios Franceses (1B)	64
Tabela 5.22 - Análise das evaporações	68
Tabela 5.23 - Caracterização do chorume acidificado a pH 2, com H ₂ SO ₄ concentrado.....	70
Tabela 5.24 - Caracterização do condensado, após evaporação do chorume, à pressão ambiente	71
Tabela 5.25 - Chorume acidificado com ácido sulfúrico a pH 2 e evaporado	72
Tabela 5.26 - Variação da natureza do ácido no pré-tratamento do lixiviado.....	72
Tabela 5.27 - Desempenho do Evaporador Unitário.....	76
Tabela 5.28 - Estatísticas descritivas das análises do Lixiviado Bruto.....	78
Tabela 5.29 - Estatísticas descritivas das análises do Resíduo 1	78
Tabela 5.30 - Estatísticas descritivas das análises do Vapor Condensado	78
Tabela 5.31 - Estatísticas descritivas das análises do Lixiviado Bruto no experimento em bancada.....	80
Tabela 5.32 - Estatísticas descritivas das análises do Resíduo Concentrado no experimento em bancada	80
Tabela 5.33 - Estatísticas descritivas das análises do Vapor Condensado no experimento em bancada	80
Tabela 5.34 - Caracterização do lixiviado bruto durante o período experimental.....	86
Tabela 5.35 - Comparação dos resultados obtidos para as diferentes temperaturas	88
Tabela 5.36 - Balanço de massa para o condensado e concentrado do lixiviado	90
Tabela 5.37 - Fração de sólidos remanescentes da evaporação dos lixiviados.....	96

Tabela 5.38 - Parâmetros físico-químico do chorume de Gramacho	100
Tabela 5.39 - Variáveis do processo da evaporação em laboratório	101
Tabela 5.40 - Parâmetros de caracterização físico-química de 500 mL de resíduo após evaporação	102
Tabela 5.41 - Parâmetros de caracterização físico-química de 1000 mL de condensado após a evaporação.	102
Tabela 5.42 - Caracterização do condensado em termos de remoção de amônia e concentração.....	105

1. INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas mais utilizadas para a disposição dos resíduos sólidos no mundo o aterro sanitário é que apresenta maior uso. Um inconveniente desta técnica, de disposição final dos resíduos, consiste na geração de lixiviados, líquidos formados através da passagem de águas de drenagem superficial, chuvas, lençol freático e nascentes pela massa de resíduos e da própria decomposição dos resíduos.

Os lixiviados apresentam grandes dificuldades no seu tratamento, uma vez que suas características variam ao longo do tempo de vida do aterro, tanto em relação ao volume como em relação à concentração e aos tipos de poluentes presentes no mesmo.

Diversas pesquisas são realizadas globalmente visando tratar esse efluente, buscando-se sempre, o alcance dos padrões de lançamentos de efluentes em corpos receptores.

Várias técnicas de tratamento têm sido utilizadas ao longo dos anos, das mais simples às mais sofisticadas, baseando-se em processos físicos, químicos, biológicos ou a combinação de dois ou mais destes processos. A escolha da técnica de tratamento deve ser baseada em uma avaliação detalhada dos parâmetros técnicos e econômicos. Uma opção tecnológica, para tratar lixiviados, é a evaporação forçada. Este tipo de tratamento consiste basicamente em evaporar os lixiviados reduzindo-os a uma fração líquida concentrada e uma fração gasosa.

A evaporação de lixiviado vem sendo estudada desde a década de 80, porém o número de publicações científicas nesta área ainda é muito incipiente. No Brasil, a tecnologia de evaporação já vem sendo praticada, porém pouco conhecimento se tem acerca dos riscos e impactos ambientais resultantes do uso deste tipo de tratamento. O presente trabalho se propõe a analisar algumas pesquisas realizadas no âmbito nacional e internacional com o intuito de elucidar melhor as principais características deste tipo de tratamento, os métodos usados na obtenção dos resultados e os principais problemas encontrados com o uso desta tecnologia no tratamento de lixiviado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar uma análise dos trabalhos científicos publicados no âmbito nacional e internacional a respeito da tecnologia de evaporação aplicada ao tratamento de lixiviados de aterros sanitários.

2.1.1. Objetivos Específicos

- Efetuar um levantamento dos trabalhos publicados sobre evaporação forçada de lixiviados de aterros sanitários destacando os pontos principais observados em cada trabalho de modo a propiciar uma base sólida para pesquisas e trabalhos futuros nesta área;

- Fazer uma análise geral entre os parâmetros de maior importância relatados em cada trabalho destacando os principais problemas e resultados encontrados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Lixiviados de aterros sanitários

Segundo Rehman (2003) lixiviados são contaminantes líquidos infiltrados através da massa de resíduos sólidos disposta nos aterros sanitários, formados pela umidade existente na massa de resíduos, decorrente do processo de degradação biológica, e pela infiltração da água da chuva na massa de resíduos aterrada. A fração orgânica dos resíduos é biodegradada e os componentes orgânicos e inorgânicos são solubilizados nas águas pluviais (SOUTO, 2009).

Os lixiviados segundo, Andrade (2002) são formados por frações orgânicas e inorgânicas compostos em solução e em estado coloidal além de uma extensa gama de microrganismos. De acordo com

Wiszniowski et al., (2006) os lixiviados são compostos por uma mistura de alta concentração de contaminantes como os ácidos húmicos, nitrogênio amoniacal, metais pesados, xenobióticos e sais inorgânicos.

Christensen et al. (2001) caracterizam os lixiviados em quatro grupos de poluentes:

- materiais orgânicos dissolvidos: ácidos graxos voláteis e compostos orgânicos mais refratários como os ácidos húmicos e fúvicos.
- macro componentes inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-).
- metais pesados: (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+})
- compostos orgânicos xenobióticos originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações (hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, pesticidas, entre outros).

Öman e Junestedt (2007), em sua pesquisa, caracterizaram 400 parâmetros e compostos presentes nos lixiviados de 12 aterros sanitários municipais suecos. Entre os compostos encontrados pode-se observar a presença mais de 90 compostos orgânicos e orgânico-metálicos e mais de 50 compostos inorgânicos. Compostos aromáticos policíclicos considerados carcinogênicos mutagênicos e causadores de anomalias também se faziam presente juntamente com compostos orgânicos voláteis, benzenos, toluenos, xilenos, metanol, etc., os quais são considerados tóxicos prejudiciais a saúde humana que na sua forma gasosa podem penetrar nas vias respiratórias humanas se dissolvendo no sangue e quando transferidos do ar para o meio aquático alteram a qualidade das águas.

Cerca de 55 compostos orgânicos e metais orgânicos também foram descobertos neste estudo, dentre os novos compostos identificados cita-se alguns fenóis, hidrocarbonetos aromáticos, dioxinas e furanos e mercúrio na forma orgânica. O mercúrio na forma orgânica, metil-mercúrio, é extremamente prejudicial à saúde humana uma vez que é um tóxico ambiental com caráter bioacumulativo.

Estima-se que haja mais compostos além dos 400 listados nas pesquisas de Öman e Junestedt (2007), uma vez que existem muitos subprodutos dos componentes listados e também não há uma metodologia em escala adequada que permita a identificação desses compostos.

Devido à diversidade a complexidade de componentes encontrados nos lixiviados, esse efluente, gerado durante e depois do

funcionamento do aterro sanitário, o seu tratamento é um desafio a ser vencido para os sistemas de tratamento de efluentes existentes, uma vez que suas características variam ao longo do tempo de funcionamento do aterro, conforme as características dos resíduos, composição, idade e tipo de aterro, além disso, a sua produção sofre mudanças devido a fatores climáticos da região onde o mesmo se situa.

3.2. Mecanismos de degradação de resíduos

O estagio de degradação dos lixiviados está diretamente relacionado com o seu impacto no meio ambiente. Aterros sanitários novos produzem lixiviados com biodegradabilidade maior do que aterros sanitários velhos e assim possuem um potencial poluidor menor (LANGE E SANTOS DO AMARAL, 2009).

A degradação biológica de resíduos em um aterro sanitário pode ser dividida basicamente em metabolismo aeróbio e anaeróbio, os quais estão condicionados à disponibilidade de oxigênio em forma de gás de origem atmosférica nas camadas de resíduos (CASTILHOS et al, 2003).

Ainda segundos Castilhos et al 2003, a degradação ocorre em fases através dos mecanismos de degradação que podem ser divididos em cinco fases:

Fase 1 (Hidrólise) – Fase com rápida decomposição aeróbia. A matéria orgânica polimérica é submetida à ação de enzimas específicas que na presença de oxigênio produz água, gás carbônico e energia para sintetizar novas células, assim há um aumento de microrganismos que rapidamente consomem o oxigênio presente, caracterizando essa fase por ser muito curta, durando em media um mês. Os lixiviados produzidos nessa fase possuem grandes concentrações de sais de alta solubilidade. Devido o aumento de temperatura pode haver a formação de sais contendo metais, há bastante formação de gás carbônico (CO₂) e hidrogênio.

Fase 2 (Acidogênese) - Com a diminuição do oxigênio, os microrganismos anaeróbios facultativos predominam, esses organismos convertem o material orgânico particulado em compostos dissolvidos por hidrólise ou liquefação. Nesta fase a obtenção de energia pelas bactérias ocorre pela transformação da matéria orgânica hidrolisada. Essa fase pode durar alguns anos e produz compostos orgânicos simples altamente solúveis como os ácidos graxos voláteis.

Fase 3 (Acetogênese) - Nesta etapa o ácido acético é produzido juntamente com o nitrogênio amoniacal. Esses ácidos na presença da água percolante na massa de resíduos faz o pH cair e variar entre 4 e 6. Esse caráter ácido faz com que materiais inorgânicos sejam melhores solubilizados, além de favorecer o aparecimento de maus odores os lixiviados nesta fase apresentam alta demanda bioquímica de oxigênio e a relação DBO/DQO indica relativa biodegradabilidade.

Fase 4 (Metanogênese) - Os compostos orgânicos simples formados na fase anterior são consumidos por bactérias estritamente anaeróbias (metanogênicas), originando metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). Os ácidos voláteis simples também são consumidos e o pH que era ácido começa aumentar, favorecendo o aparecimento dessas bactérias metanogênicas, que tem preferência por pH neutro. Qualquer mudança de pH pode provocar alterações na quantidade de bactérias prejudicando a decomposição dos resíduos. O aumento do pH diminui a solubilidade de compostos inorgânicos, reduzindo a condutividade do lixiviado. Nesta fase a DBO apresenta-se baixa, o que caracteriza a diminuição da capacidade de biodegradação do lixiviados.

Na Figura 3.1 apresentam-se resumidamente os acontecimentos de cada fase e os compostos produzidos.

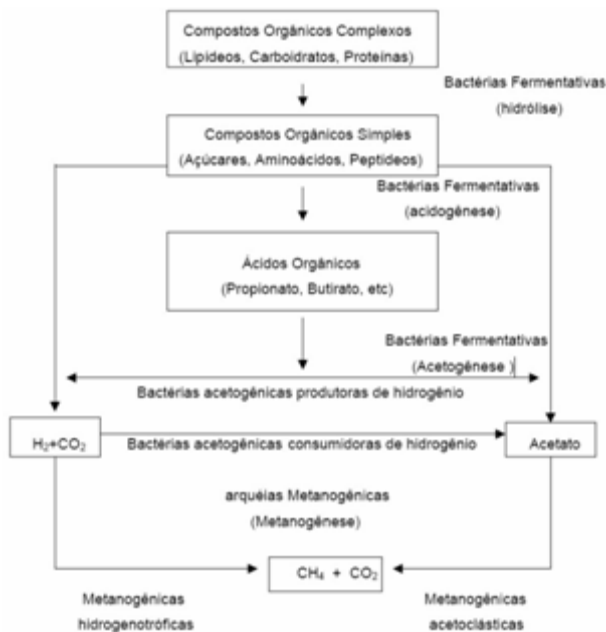


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de decomposição dos resíduos sólidos no aterro sanitário.

Fonte: Bello, 2009

Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993) e Bidoni e Povinelli (1999) adicionam mais uma fase de degradação além das quatro citadas acima, nesta quinta fase após toda a matéria orgânica biodegradável ser consumida os gases gerados no aterro passam a decrescer com o tempo. Na Figura 3.2 apresentam-se as fases de estabilização descritas acima, observadas em um aterro experimental com recirculação de lixiviado estudadas por Pohland and Harper em 1986.

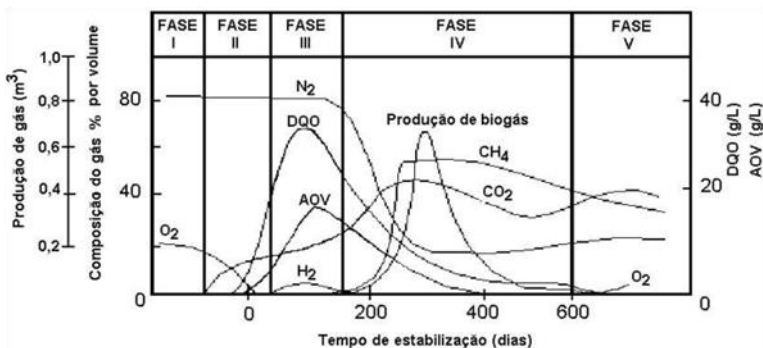


Figura 3.2 - Fases de estabilização de percolados em aterros sanitários
Fonte: POHLAND et a. 1986

Embora a divisão em fases venha facilitar o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário e seus impactos sobre os lixiviados, em termos práticos essas fases não são tão bem definidas uma vez que sempre há o aterramento de uma nova massa de resíduos causando grande variabilidade nos materiais e componentes do aterro.

3.3. Caracterização e estimativa da produção de lixiviados

Segundo Souza (2005) caracterizar os lixiviados é fundamental para a escolha do sistema de tratamento a ser utilizado, no entanto essa caracterização é muito difícil uma vez que as características dos lixiviados variam ao longo do tempo de sua disposição no aterro sanitário.

Diversos fatores interferem na qualidade dos lixiviados e entre eles podemos destacar: composição dos resíduos sólidos dispostos, idade dos resíduos, tipo de tecnologia de aterramento empregada, além disso, fatores como a profundidade dos resíduos dispostos, seqüência da disposição, umidade e temperatura interferem na grande variabilidade desse efluente (PALMISANO e BARLAZ, 1996).

Não há um lixiviado típico, pois cada lixiviado leva consigo os constituintes da massa de resíduos sólidos enquanto flui assim cada

Aterro sanitário produz um lixiviado específico e para a sua caracterização os fatores citados acima precisam ser considerados.

Os parâmetros mais utilizados para descrever a contaminação no lixiviado são: (i) demanda química de oxigênio; (ii) nitrogênio amoniacal; (iii) sólidos dissolvidos; (iv) sólidos suspensos; (v) compostos orgânicos xenobióticos; (vi) metais pesados; e (vii) sais (CHRISTENSEN et al., 2001).

Geralmente o lixiviado recebe uma classificação de acordo com a idade do aterro e também de acordo com a relação DBO/DQO (razão de biodegradabilidade). Esta razão de biodegradabilidade sofre uma diminuição no decorrer da idade do aterro. Uma biodegradabilidade baixa sugere que uma grande parte biodegradável dos resíduos já tenha sido digerida indicando um aterro com idade avançada.

A seguir apresenta-se a

Tabela 3.1 com a composição dos lixiviados de diferentes locais reportados pela literatura.

As características destes líquidos percolados estão representadas pelos parâmetros básicos pH, DQO, DBO, relação DBO/DQO, COT, N-NH₃, NTK, Cl⁻, ST e SS. Os dados mostram que a idade do aterro sanitário tem um efeito significativo na qualidade dos lixiviados, apresentando grande variação na composição em função do tempo. A grande maioria dos parâmetros de qualidades usualmente utilizados para quantificar o grau de contaminação dos lixiviados, em termos de concentração, decai com o tempo de vida do aterro, exceto pH.

Tabela 3.1 - Composição dos lixiviados reportados da literatura

Local	Idade	pH	DQO mg L ⁻¹	DBO mg L ⁻¹	DBO/DQO	COT mg L ⁻¹	N-NH ₃ mg L ⁻¹	TKN mg L ⁻¹	Cloretos mg L ⁻¹	ST mg L ⁻¹	SS mg L ⁻¹	Referência
China	novo	6,9	3.780-28.100	1.040-11.300	0,3-0,7	-	1.040-3.560	-	-	-	850-5.840	[1]
China (H.Kong)	novo	7-8,3	17.000	7.300	0,43	-	3.000	3.200	12.000	-	>5.000	[2]
Coreia do Sul	novo	7,3	24.400	10.800	0,44	-	1.682	1.766	3.160	-	2.400	[3]
Coreia do Sul	novo	6,6	41.507	32.790	0,79	-	1.896	2.482	-	32.685	1.873	[4]
França	novo	7,2	920	506	0,55	-	118	-	3.300	-	137	[5]
Grécia	novo	6,2	70.900	26.800	0,38	-	3.100	3.400	3.270	55.000	950	[6]
Turquia	novo	7,3-7,8	16.200-20.000	10.750-11.000	0,55-0,66	5.100-6.000	1.120-2.500	1.350-2.650	-	-	-	[7]
China	médio	6,9-7,65	15.300-17.600	6.400-7.200	0,41	4.750-4.930	350-390	-	1.750-1.870	-	418-457	[8]
Coreia do Sul	médio	7,9	5.348	2.684	0,5	-	1.826	2.192	-	13.095	143	[4]
França	médio	8,2	4.100	200	0,05	1.430	1.040	-	5.420	-	200	[9]
Itália	médio	8,38	5.050	1.270	0,25	-	1.330	1.670	3.130	-	-	[10]
Taiwan	médio	8,1	6.500	500	0,08	4.000	5.500	-	6.000	-	-	[11]
Turquia	médio	8,2	12.860	5.270	0,41	-	2.240	2.580	3.100	-	345	[12]
Brasil	velho	8	3.079	1.244	0,4	1.052	1.248	-	2.353	8.071	-	[13]
Brasil	velho	8,2	3.460	150	0,04	820	800	-	4.130	-	-	[14]
Dinamarca	velho	6,9	624	90	0,12	174	363	-	353	-	-	[15]
Finlândia	velho	7,7	228	27	0,012	-	101	-	-	2.109	46	[16]
França	velho	8,1	314	13	0,04	-	118	-	916	-	16	[5]
Suécia	velho	7,6	688	25	0,037	220	260	300	1.471	-	196	[17]
Suécia	velho	7,4	920	59	0,064	320	530	-	850	4.100	-	[18]

COT- Carbono Orgânico Total; DQO- Demanda Bioquímica de Oxigênio; DBO- Demanda Biológica de Oxigênio; pH- Potencial Hidrogeniônico; ST- Sólidos Totais; SS- Sólidos Suspensos; NTK- Nitrogênio Total Kjeldahl; N-NH₃- Nitrogênio Amônico

[1] Yang e Zhou (2008); [2] Lo (1996); [3] Im et al. (2001); [4] Kang, Shin e Park (2002); [5] Giust, Visintin e Del Piccolo (2007); [6] Tatsi et al. (2003); [7] Timur e Öztürk (1999); [8] Chen, Sun e Chung (2008); [9] Amokrane, Comel e Veron (1997); [10] Frascari et al. (2004); [11] Wu et al. (2004); [12] İlhan et al. (2008); [13] Máximo (2007); [14] Silva, Dezotti e Sant'Anna Jr. (2004); [15] Kjeldsen e Christophersen (2001); [16] Ettala (1998); [17] Öman e Junestedt (2008); [18] Waara et al. (2003);

Fonte: Haddad, 2009

De acordo com a

Tabela 3.1 a concentração de DQO mostra uma grande diferença entre os lixiviados de aterros sanitários novos e antigos.

A tabela também evidencia que os lixiviados maduros apresentem baixas concentrações de matéria orgânica biodegradável, mas contêm altas concentrações em termos de N-NH_3 . E a faixa de pH está entre 6,2-8,3 que Christensen, Cossu e Stegmann (1989) justificam como sendo um valor com tendência a aumentar visto que os ácidos voláteis são convertidos pela atividade biológica em metano e dióxido de carbono.

A estimativa de produção de lixiviados, além da sua caracterização, é outro fator muito importante para a sua tratabilidade nos aterros sanitários. No entanto, essa estimativa pode ser influenciada por fatores climáticos (precipitação, evapotranspiração e temperatura), pelas características hidrogeológicas do aterro (infiltração, recirculação e topografia), pelas características da camada de cobertura do aterro, pelas características dos resíduos aterrados e pelo método de impermeabilização do local (LANGE E SANTOS DO AMARAL, 2009).

Uma estimativa correta da produção de lixiviados em aterros sanitários permite que os sistemas de drenagem e de tratamento dos mesmos possam ser corretamente dimensionados.

3.4. Técnicas de tratamento de Lixiviados

Ranzi (2009) relata que as técnicas de tratamento de lixiviados devem considerar um amplo espectro de possibilidades uma vez que, esses efluentes variam, ao longo do tempo de vida dos aterros, em quantidade, composição e concentração.

No entanto Qasim e Chiang (1994) afirmam que o projeto de uma estação de tratamento para esse efluente não é um projeto simples, pois os lixiviados não possuem uma composição padrão como diversos efluentes específicos.

Normalmente diversas técnicas são empregadas para tratar os lixiviados de aterros sanitários, em algumas situações há necessidade do uso de técnicas combinadas devido à variabilidade de composição desse efluente.

A seguir serão relatadas algumas técnicas existentes bem como suas principais aplicações e características.

3.4.1. Recirculação e tratamento conjugado de lixiviados

Dentre diversas alternativas existentes a mais econômica é a que consiste em recircular o lixiviado na massa de resíduos do próprio aterro. Nessa alternativa de tratamento, o aterro sanitário funciona como um reator anaeróbio onde os ácidos graxos são convertidos em gás metano. Durante a recirculação a umidade dos resíduos aumenta, favorecendo o ambiente anaeróbio e conseqüentemente a produção de gás metano. Esse tipo de tratamento funciona como um pré- tratamento necessitando de um tratamento posterior para alcançar os limites exigidos pela legislação de lançamento de efluentes (GIRALDO, 2001).

Porém, devido às características do lixiviado poderá haver uma inibição da atividade microbiológica, devido à presença de metais, por exemplo. Além disso deve-se atentar para o monitoramento da estabilização do aterro sanitário devido às alterações físicas, químicas e biológicas que ocorrem dentro do aterro. (FERREIRA et al., 2009).

3.4.2. Tratamento biológico

O processo de tratamento biológico consiste em controlar o ambiente necessário para um crescimento ótimo dos microrganismos envolvidos. Os microorganismos são utilizados para converter substâncias coloidais, matéria orgânica dissolvida carbonácea e compostos ou elementos inorgânicos, como elementos de N, P, S, K, Ca e Mg em tecido celular e / ou em vários gases (Wiszniewski et al., 2006). O tratamento biológico poderá ser aeróbio quando ocorre na presença de oxigênio gerando gás carbônico e água ou anaeróbio, na ausência de oxigênio gerando principalmente metano e gás carbônico.

O tratamento anaeróbio é indicado para lixiviados jovens onde a matéria orgânica é altamente biodegradável. A literatura apresenta vários tipos de tratamentos anaeróbios e a escolha do tratamento deve prever o custo, a operação, a manutenção a instalação, bem como a área disponível para o tratamento. Além disso, também, deve-se prever o volume de lodo gerado e a capacidade de autodepuração do corpo receptor existente (GIRALDO, 2001).

Segundo (GOMES et al, 2009) os processos anaeróbios são vantajosos principalmente por possibilitarem a geração de biogás, possibilitando a utilização do mesmo, como energia. Além disso, há uma geração menor de lodo diminuindo os custos de manutenção e operação. Porém altas quantidades de amônia pode gerar problemas de toxicidade para os microrganismos. De forma geral, para tratamentos anaeróbios, o lixiviado precisa de um tratamento prévio que visa à redução dos efeitos da toxicidade além de outros problemas operacionais (GIRALDO 2001).

Já o tratamento aeróbio é amplamente aplicado sob as formas de: lagoas aeradas, sistema de lodos ativados e até processos avançados combinados como os reatores biológicos associados a membranas. Este tipo de tratamento geralmente é aplicado quando se quer reduzir a DBO do lixiviado. Os custos de operação e manutenção são mais altos em comparação aos processos anaeróbios para o tratamento de lixiviados jovens, nestes casos o tratamento aeróbio vem sendo utilizado como um pós-tratamento dos sistemas anaeróbios (GIRALDO 2001).

Quanto a problemas operacionais do tratamento aeróbio Giraldo (2001) cita alguns problemas como a geração de espumas e precipitação de ferro e em sistemas de lodos ativados há problemas com a variação da carga orgânica e com a carga hidráulica do lixiviado. Além disso, se os lixiviados apresentarem quantidades significativas de compostos orgânicos voláteis estes devem ser removidos, acarretando em um custo maior para o tratamento, a fim de não haver transferência da fase líquida para a fase gasosa desses poluentes ambientais.

3.4.3. Tratamento físico-químico

Os processos físicos químicos são usados geralmente como pré-tratamento, na remoção de amônia, uma vez que elevadas concentrações de amônia em corpos d'água ocasionam desequilíbrios dentro do ciclo de nitrogênio, além disso, os processos físico-químicos também são utilizados como pós-tratamento para remoção de compostos recalcitrantes.

O tratamento físico químico pode complementar ou até substituir o tratamento biológico de lixiviados, entretanto ele é aplicado apenas para lixiviados antigos uma vez que a fração biodegradável é pequena (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

Ainda de acordo com Mcbean; Rovers; Farquhar, (1995), os tratamentos físico-químicos usados no tratamento de lixiviados consistem na adição de compostos químicos para precipitar, coagular ou oxidar frações orgânicas e inorgânicas presentes, adsorção por carvão ativado e resinas de trocas iônicas e tratamento com membranas.

Dentre os processos físico-químicos, a evaporação/destilação dos lixiviados é um método que vem se mostrando bastante eficaz em comparação aos métodos usuais. O item a seguir apresentará uma introdução ao tratamento dos lixiviados por evaporação/destilação, assim como alguns estudos já realizados nesta área.

3.4.4. Evaporação de lixiviados

Devido às características dos lixiviados, alta carga poluidora, elevadas concentrações de amônia, cloretos, substâncias recalcitrantes, compostos orgânicos e inorgânicos entre outros poluentes, as técnicas de tratamento existentes apresentam custos elevados ou necessitam de combinação dos tratamentos para alcançar os padrões de lançamentos de efluentes tratados.

É nesse âmbito que, como alternativa de tratamento, apresenta-se a evaporação de lixiviados de aterros sanitários. Essa técnica permite tratar de forma combinada em um único processo os gases e o lixiviado do aterro, que resulta num lodo que pode ser disposto no próprio aterro (ROE et al., 1998).

A evaporação permite a redução de volume dos lixiviados e o aproveitamento da energia do próprio aterro, ou energia solar, para aquecer o lixiviado.

O termo evaporação, segundo Rehman (2003), pode ser definido como uma operação em que a substância muda do estado líquido para o gasoso. O objetivo da evaporação é separar a solução (lixiviado) em um soluto não volátil (concentrado) e um solvente volátil (vapor de água) Rehman (2003) também afirma que a evaporação como tratamento de lixiviados tem a vantagem de promover uma separação dos compostos voláteis dos não voláteis. Os compostos sólidos e os metais ficam concentrados após a evaporação.

3.4.4.1. Evaporação natural

Essa técnica de evaporação utiliza a energia solar favorecendo o processo de evaporação, condensação e precipitação do líquido a ser evaporado. Segundo Cantanhede et al. (2009) a maioria dos evaporadores naturais possuem uma cobertura transparente sobre um tanque como uma lâmina líquida pouco profunda. O processo de evaporação natural consiste em permitir que a radiação solar aqueça o líquido fazendo com que o vapor se condense em uma superfície mais fria para sua posterior coleta que pode ser feita a partir de canaletas.

Cantanhede et al. (2009) ainda avalia que a inclinação da cobertura transparente influencia diretamente o processo de evaporação, pois quanto maior for a inclinação maior será a quantidade de radiação absorvida pelo evaporador.

Ranzi (2009) em seus estudos avaliou a evaporação natural com o uso de painéis evaporativos e obteve uma redução da carga orgânica e inorgânica do líquido através da recirculação constante no seu sistema evaporativo. Além disso, também constatou, durante a caracterização do líquido concentrado, que este apresentava um grau de poluição menor no efluente concentrado do que o efluente bruto. De modo geral, a evaporação com painéis evaporativos mostrou-se de simples operação e é indicada para aterros de pequeno porte localizados em locais com grande insolação e baixa pluviometria.

3.4.4.2. Evaporação forçada

O princípio da evaporação forçada é similar ao da evaporação natural, porém, na evaporação forçada, o processo evaporativo utiliza uma fonte de energia não natural para se desenvolver, em aterros sanitários geralmente usa-se o biogás do próprio aterro para realizar esse processo.

Além disso, no processo de evaporação forçada os vapores e gases liberados pelo aquecimento do líquido são coletados por um duto ou chaminé de forma que possam receber um tratamento ou serem liberados para a atmosfera.

4. METODOLOGIA

Como forma de adquirir o embasamento teórico para este estudo primeiramente foi realizado um levantamento das publicações existentes sobre o tema, evaporação de lixiviados, para possibilitar posteriormente, o estabelecimento de relações, quando as mesmas existirem e comparar os dados apresentados nos casos estudados.

A compilação das informações ocorreu no aspecto nacional e internacional.

Foram compiladas e analisadas, 12 publicações, 3 nacionais e 9 internacionais disponibilizadas nas bases de pesquisas durante as três ultimas décadas (1980-2010).

Na descrição de cada publicação foram levantados os aspectos operacionais e os principais resultados e parâmetros principais obtidos com o intuito de proporcionar um melhor entendimento das características dos sistemas de tratamento de lixiviado por evaporação

5. RESULTADOS

5.1. Modelo de evaporação semi-contínua para a avaliação do processo de tratamento de lixiviados, Marks et al., 1994.

Em suas pesquisas Marks et al.(1994) relata que a evaporação permite a separação entre os componentes voláteis e não voláteis.

Um tipo comum de processo de evaporação é a evaporação flash em um estágio, mostrada na Figura 5.1, na qual a mistura líquida é aquecida e entra em uma câmara de pressão a baixa pressão. A mistura se evapora parcialmente e os vapores entram em equilíbrio com o líquido residual em uma nova pressão e temperatura, porém mais baixas. Nesses termos, o produto líquido resultante na Figura 5.1 é mencionado como o concentrado, enquanto que o vapor produzido, que se transforma em líquido sob condensação, é mencionado como evaporado.

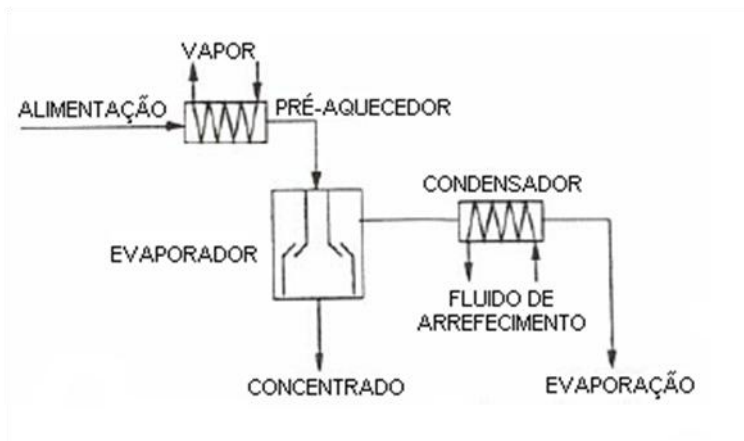


Figura 5.1 - Esquema da evaporação tipo "flash" um estágio

Os autores relatam que foi desenvolvido um modelo de simulação do processo, o Modelo de Evaporação de Equilíbrio da Reação (REQEM), para auxiliar a avaliação de engenharia quanto aos processos de tratamento da evaporação dos lixiviados. O modelo foi configurado para: i) simular diferentes processos de evaporação flash, ii) prognosticar a composição e quantidades do efluente e, iii) calcular as necessidades de energia. Esse modelo foi projetado para simular processos de evaporação, a partir da perspectiva da engenharia ambiental, e tem uma combinação de recursos para simular a evaporação de fluidos com composição complexa, tais como lixiviados ou outras águas servidas.

O modelo possuía a capacidade de simular evaporações flash de um ou de múltiplos estágios, com ou sem recirculação. Os dados físico-químicos utilizados durante a simulação utilizando o REQEM eram obtidos a partir de bancos dados existentes.

5.1.1. Resultados e Discussões apresentados por Marks et al., 1994.

O pH inicial do lixiviado influencia fortemente a separação dos agentes contaminantes nos processos de evaporação. Dessa forma o modelo simulou um processo de uma evaporação flash de um estágio, usando a média anual dos dados das características de um lixiviado de aterro operado pela Autoridade de resíduos sólidos de Delaware, EUA (1990) para avaliar o efeito do pH de alimentação sobre a qualidade da evaporação.

A qualidade média do lixiviado era de $\text{NH}_3 = 578 \text{ mg N/L}$ e a demanda química de oxigênio – DQO igual a 8.800 mg/L (em relação ao ácido acético equivalente); as outras espécies relatadas no lixiviado do aterro estão relacionadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características do lixiviado de aterro sanitário

Parâmetros (mg/L exceto pH)	Autoridade de Delaware, EUA, em lixiviados de resíduos sólidos. Médias anuais (1990)	Pensilvânia Occidental, EUA. Típicos valores de lixiviados
pH	6,2	N/D
DBO (mg/L)	N/D	N/D
DQO (mg/L)	8795	954
$\text{NH}_3 - \text{N}$ (mgN/L)	578	357
Alcalinidade (mg/l CaCO_3)	N/D	N/D
Dureza (mg/l CaCO_3)	N/D	N/D
Cálcio	778	200*
Magnésio	306	60
Sódio	1375	N/D
Potássio	N/D	N/D
Cloreto	1482	193

NO2/ NO3 - N	1,0	0,05
Sulfato (mg/L)	243	290
Total de carbonato	1321*	3900*
Total de fósforo	N/D	N/D
Sólidos dissolvidos	N/D	N/D
Sólidos em suspensão	N/D	N/D
Tolueno	0,55	0,25
*valor estimado		

Nas simulações, o lixiviado foi pré-aquecido a 80° C. Quatro casos diferentes foram simulados. Em dois casos, o pH inicial foi ajustado para o valor 4, usando HCl e H2SO4, respectivamente. No terceiro caso, o valor do pH do lixiviado afluente permaneceu inalterado com base em seu valor inicial de 6,2 e, no quarto caso, o pH foi ajustado para 10 usando NaOH.

As concentrações evaporadas e o percentual restante no evaporado para os diferentes ajustes do pH são mostrados na Figura 5.2 para a amônia e o ácido acético, respectivamente.

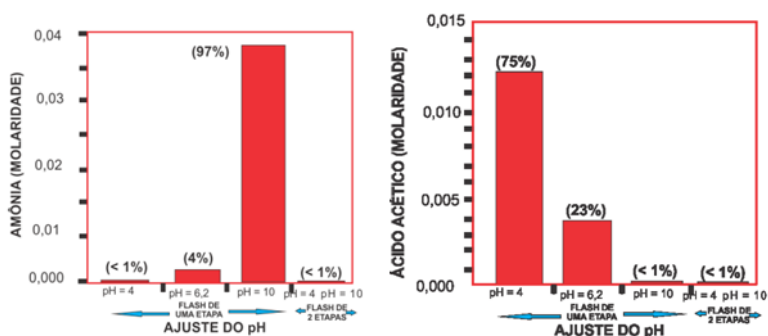


Figura 5.2 - Concentração de Amônia e Ácido Acético no destilado

Como pode ser observado na Figura 5.2 houve a separação de 99% da amônia no destilado analisado. Em função do ajuste do nível do pH inicialmente feito, a amônia no lixiviado foi transformada em íon amônio e não evaporou. Entretanto, 75% por cento do ácido acético original passou para o destilado. Assim sendo, a evaporação de uma fase com ajuste do pH do ácido pode ser adequada para a produção de um evaporado que tenha baixas concentrações tanto de amônia quanto de ácidos orgânicos voláteis, mas somente se o lixiviado contiver baixas concentrações de ácidos orgânicos voláteis.

Uma simulação do processo de evaporação em pH básico de uma etapa mostrou a separação de ácidos orgânicos voláteis no evaporado. Com o pH inicial a 10, o ácido acético é iônico e 99 % permaneceu no concentrado, enquanto que a maior parte da amônia foi transformada em espécies voláteis e 3% permaneceram no concentrado. Dessa forma, uma evaporação de uma fase com ajuste do pH básico pode vir a ser adequado para a produção de um destilado livre de tanto de ácidos orgânicos voláteis quanto de amônia, mas apenas se baixa quantidade de amônia estiver inicialmente presente no lixiviado.

Uma simulação do processo de duas etapas para a evaporação pode ser necessária para a remoção da amônia de ácidos orgânicos voláteis quando altos níveis de ambos os compostos estão presentes no lixiviado. Processos de evaporação de duas fases de ácido / base foram simulados através do ajuste do pH para 4, pré-aquecendo o lixiviado a 97° C e fazendo a evaporação parcial a 80° C (355 mm Hg); a segunda fase foi simulada condensando o evaporado, ajustando o pH para 10 e fazendo a evaporação parcial a 50° C (92,5 mmHg). O prognóstico da qualidade do evaporado do lixiviado aumenta enormemente no processo de duas etapas. Quase 99 por cento de ambos, a amônia e o ácido acético foram retidos nos concentrados de um processo de duas fases de ajuste do pH ácido / base. Assim sendo, o processo de evaporação ácido / base de duas fases ou uma tecnologia equivalente que incorpore a destilação com a evaporação seria necessária para se obter uma qualidade de evaporação satisfatória para um lixiviado que tenha altos níveis tanto de amônia quanto de ácidos orgânicos voláteis.

Outro conjunto de simulações foi realizado para avaliar a disposição do tolueno para o caso dos dados do lixiviado relatado pela Autoridade de Resíduos Sólidos de Delaware – EUA.

Esperava-se que a concentração do tolueno no evaporado não variasse em função do ajuste do pH. As concentrações previstas de tolueno no evaporado ficaram entre 74 – 76 por cento do total de

tolueno em um processo de simulação flash de uma fase, com ajuste de pH de 4, 6,2 e 10. Assim sendo, se quantidades significativas de compostos orgânicos voláteis não iônicos, tal como o tolueno, estão presentes no lixiviado, medidas adicionais podem ser necessárias para se obter uma adequada qualidade de evaporação.

Uma simulação da potencialidade de corrosão foi realizada e a mesma demonstrou que para diminuir a probabilidade de corrosão durante a evaporação flash em estágio ácido, deve ser usado HCl no lugar de H₂SO₄, no ajuste do pH do lixiviado.

Em evaporações flash de múltiplos estágios com recirculação houve o uso de uma quantidade menor de energia do que para o bombeamento do evaporador flash de um estágio com recirculação, produzindo o mesmo volume de destilado.

Uma evaporação flash de um estágio com recirculação teve um grau de desempenho similar ao do processo flash de quatro estágios com reciclagem. No entanto, o processo de evaporação flash de um estágio com reciclagem requer um pré-aquecimento de 3,5 vezes maior do volume do lixiviado do que o processo flash de quatro estágios com reciclagem. Como resultado da diferença de temperatura e requisitos de pré-aquecimento, o processo de quatro estágios com recirculação, e sem recuperação de calor, usou aproximadamente a mesma quantidade de vapor para produzir a mesma quantidade de evaporado de um processo de um estágio com reciclagem, embora o segundo requeira maior capacidade de processamento volumétrico.

Ainda referente a simulações de evaporações utilizando o lixiviado proveniente do aterro sanitário de Delaware, EUA e o lixiviado proveniente do aterro sanitário da Pensilvânia ocidental (EUA) (ver Tabela 5.1), foi simulado, um processo de evaporação flash ácido / base de duas fases, quatro estágios, com recirculação.

O lixiviado da Autoridade de Resíduos Sólidos de Delaware, EUA, continha quase dez vezes a quantidade de ácido acético e o dobro da quantidade de amônia relatada no lixiviado da Pensilvânia

Primeiramente, o lixiviado teve seu pH ajustado para 4, foi pré-aquecido a 97° C, destilado no estágio final a 40° C e recirculado até aproximadamente 95 por cento do volume. No segundo passo, o lixiviado teve seu pH ajustado para 11, foi pré-aquecido a 97° C, destilado no estágio final a 40° C e recirculado até aproximadamente 98 % do volume ser obtido.

Como era de se esperar, menos de um por cento da amônia e do ácido acético, e menos de sete por cento do fenol, permaneceram no

evaporado final em cada lixiviado. O tolueno se transferiu ao evaporado final. Um tratamento separado seria necessário para remover o tolueno remanescente. O pré-tratamento de destilação a vapor, como nas instalações de evaporação alemã, ou a destilação a ar, como a realizada nas instalações suíças de evaporação, são duas alternativas possíveis para a remoção dos compostos orgânicos voláteis.

Para o lixiviado da Autoridade de Resíduos Sólidos de Delaware, EUA, é necessário um processo de ajuste do pH em duas fases, para remover a amônia, o ácido acético e o fenol a níveis aceitáveis. Na simulação, foram adicionados 3.300 mg/L de ácido sulfúrico, para manter o pH em 4 no decorrer da evaporação. Para o ajuste do pH em básico, foram adicionados inicialmente 7.700 mg/L de hidróxido de sódio, e não houve necessidade uma quantidade de base adicional durante o percurso, para manter o pH acima de 11. Foi previsto que o lixiviado de alimentação seria recirculado 25 vezes no primeiro passo e 38 vezes no segundo. O grau calculado do desempenho para o processo de duas fases era de 0,5 kg de evaporado por quilo de vapor. O grau de desempenho foi baixo, porque o evaporado tinha que ser vaporizado duas vezes, para remover tanto a amônia, quanto o ácido acético. Como resultado, o dobro da quantidade de vapor teve que ser usada para produzir aproximadamente a mesma quantidade de evaporado, como na evaporação flash de uma fase. O segundo fluxo de efluente de concentrado contém acetato em quantidade significativa e pequenas quantidades de fenolato. Na prática, é possível descartar esse concentrado em um sistema de esgoto, sem maiores tratamentos, além do ajuste do pH.

Para o lixiviado da Pensilvânia ocidental, EUA, as simulações mostram que um processo de evaporação flash de fase única e quatro estágios pode ser suficiente para obter uma qualidade aceitável de evaporação, desde que as concentrações iniciais de ácido acético e fenol sejam baixas. As molaridades previstas da evaporação para um tratamento de fase única do lixiviado da Pensilvânia foram similares.

A, Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4, apresentam os resultados das simulações realizadas com o lixiviado dos dois aterros.

Tabela 5.2 - Concentrações para evaporação flash, duas fases quatro estágios utilizando lixiviados de Delaware, EUA (concentrado) -

ESPÉCIES	MOLARIDADE DO CONCENTRADO 1	MOLARIDADE DO CONCENTRADO 2	MOLARIDADE DA EVAPORAÇÃO
----------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------

H	1,1E - 04	4,1E - 12	---
NH ₄	4,9E - 01	5,1E - 31	---
NH ₄ OH	6,3E - 05	5,1E - 31	7,7E - 05
Acetato	7,1E - 02	3,2E + 00	---
Ácido acético	3,3E - 01	5,0E - 07	1,4E - 07
Fenolato	4,4E - 10	1,7E - 03	---
Fenol	3,1E - 05	4,3E - 06	2,9E - 06
Tolueno	6,4E - 06	5,1E - 31	6,0E - 06

Tabela 5.3 - Concentrações para evaporação flash,duas fases quatro estágios utilizando lixiviados da Pensilvânia, EUA (concentrado)

ESPÉCIES	MOLARIDADE DO CONCENTRADO 1	MOLARIDADE DO CONCENTRADO 2	MOLARIDADE DA EVAPORAÇÃO
H	1,7E - 04	2,4E - 12	---
NH ₄	4,4E - 01	6,6E - 30	---
NH ₄ OH	8,6E - 05	9,6E - 31	5,4E - 05
Acetato	9,2E - 03	1,8E - 01	---
Ácido acético	5,3E - 02	3,8E - 08	1,5E - 08
Fenolato	1,5E - 12	1,7E - 03	---
Fenol	1,8E - 07	5,1E - 06	1,4E - 08
Tolueno	5,2E - 06	9,6E - 31	3,3E - 06

Tabela 5.4 - Concentrações para evaporação flash,duas fases quatro estágios utilizando lixiviados de Delaware,EUA (Destilado)

Espécies	Molaridade prevista do evaporado de uma fase da Pensilvânia ocidental (EUA)	Molaridade prevista do evaporado de duas fases da Autoridade de Resíduos Sólidos de Delaware (EUA)
NH ₄ OH	5,0E - 05	7,7E - 05
Ácido acético	1,3E - 02	1,4E - 07
Fenol	3,8E - 07	2,9E - 06
Tolueno	2,6E - 06	5,1E - 31

5.2. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários (Birchler et al., 1994)

Em suas experimentações com destilação de lixiviados, em caráter laboratorial, Birchler et al (1994), utilizou dois tipos de amostras de lixiviados. Além disso, para avaliar a qualidade da evaporação os autores utilizaram também, uma solução de ácido, com o objetivo de avaliar a qualidade do evaporado no processo de tratamento de lixiviados de aterros sanitário por evaporação forçada.

A pesquisa foi enfatizada na análise química de dois componentes principais, amônia e ácidos orgânicos voláteis expressos através dos valores de DQO.

Foram realizadas destilações em um único estágio e em dois estágios sob diferentes condições de pH e pressões. Nos experimentos realizados, cerca de 1 litro de amostra de lixiviado foi utilizado e aproximadamente 90 % da amostra foi destilada em cada estágio.

Na Tabela 5.5 a seguir apresentam-se as técnicas analíticas para as análises de poluentes realizada por Birchler et al (1994).

Tabela 5.5 - Métodos Analíticos Utilizados por Birchler, 1994

Parâmetros	Unidades	Metodologia Analítica	
pH	-	Potenciométrico	
DQO	mg/L	Método titulométrico – Refluxo Fechado	
Cloretos	mg/L	Potenciométrico	Eletrodo íon seletivo
NH ₃	mg/L	Titulométrico	
Condutividade	µS/cm	Potenciométrico	Condutivímetro

Fonte: Adaptado de Birchler et al 1994

Um balanço de massa também foi feito para avaliar os erros que podiam ter sido cometidos nas análises. As concentrações dos componentes, nos concentrados e nos destilados, foram comparadas com as concentrações nas amostras originais para que o erro pudesse ser calculado.

Foram desenvolvidos dois aparatos experimentais para realizar os ensaios de evaporação.

O primeiro aparato experimental era composto por um evaporador com vácuo aplicado e coluna de destilação, balão volumétrico e um receptor para coletar o efluente condensado.

O segundo aparato experimental desenvolvido possuía um balão volumétrico com volume de 1 litro, um condensador em espiral e um Erlenmeyer para coletar o evaporado. Uma chapa aquecedora transferia calor para o balão volumétrico e termômetros mediam a temperatura do líquido e do evaporado. O vácuo também foi aplicado a esse sistema e pressão aera controlada através de um manômetro.

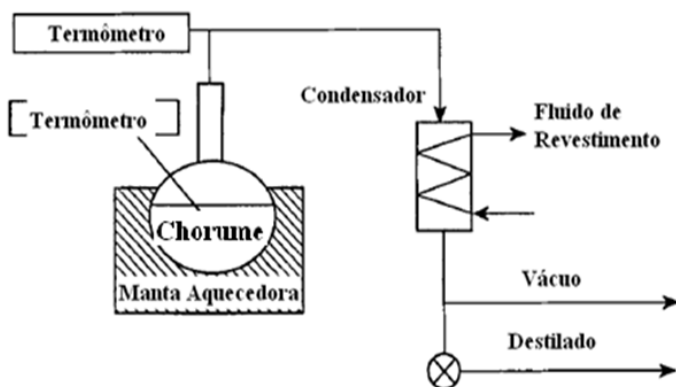


Figura 5.3 - Aparato I Utilizado por Birchler et al, 1994

Alíquotas de três tipos de lixiviados, duas amostras de lixiviados forte coletadas em aterros com idade superior a 25 anos e uma amostra de lixiviado fraco (diluído em águas pluviais) de um aterro com mais de 30 anos foram utilizadas. Além disso, uma solução padrão de ácido acético, com DQO conhecida, feita em laboratório, foi utilizada também para avaliar a qualidade do seu evaporado e condensado e comparar com os resultados encontrados nas análises do lixiviado concentrado e condensado respectivamente.

5.2.1. Resultados obtidos por Birchler et al, 1994

Em evaporação realizada com lixiviados fracos e acidificada com ácido sulfúrico, H_2SO_4 , em único estágio a pressão atmosférica, sendo 90% do lixiviado destilado, os resultados mostraram que o concentrado apresentava grandes quantidades de amônia, NH_3 , e altas concentrações de DQO, já o destilado apresentou baixas concentrações de cloretos (vide Tabela 5.6).

Com destilações feitas utilizando lixiviados fortes, também em um único estágio, houve formação de espumas e os cloretos foram separados da fase líquida e gasosa, no entanto a remoção de cor foi excelente apresentando um condensado clarificado e valores de amônia e DQO efetivamente baixos (os resultados podem ser conferidos na Tabela 5.6).

Evaporações com ácido acético foram realizadas, em duas condições, uma condição ácida e outra condição básica, 90 % da solução de ácido acético foi destilada e constatou-se que em condições ácidas o ácido acético tem caráter moderadamente volátil, sendo uma parte do mesmo transferido para o condensado. Já em condições básicas a amônia apresentou-se em caráter bastante volátil e a DQO se manteve no concentrado.

Na realização de destilações em dois estágios de caráter ácido, cada um, foram utilizadas amostras de lixiviados fracos. Uma grande parte da amônia foi removida, ou seja ficou no concentrado, no entanto cerca da metade de DQO foi carregada para o destilado.

Em destilações com dois estágios, um ácido seguido de um estágio básico, 99,5% da DQO foi removida no estágio básico, pois houve uma mudança no equilíbrio ácido acético/acetato.

Outros ensaios de destilação foram realizados. Um desses ensaios, em duas fases, não necessitou de ajuste de pH em cada fase, pois o lixiviado e o destilado da primeira etapa de evaporação apresentavam características levemente básicas, e toda a amônia (NH_3) foi transferida para o destilado da segunda fase, no entanto praticamente toda a DQO foi removida.

Em testes com duas fases, uma fase ácida e outra fase básica, em pressão atmosférica mostraram que quase toda a amônia foi removida na primeira etapa e a maior parte da DQO ficou concentrada no condensado já que o lixiviado em questão apresentava poucas concentrações de ácidos orgânicos voláteis. Na fase básica de evaporação a destilação fez que com a DQO diminuísse novamente.

Concluídos os testes chegou-se ao resultado de que os experimentos em lixiviados fracos com fase ácida única produziram um destilado com alta qualidade quando o lixiviado bruto apresenta baixas concentrações de DQO volátil.

Tabela 5.6 - Qualidade dos destilados e concentrados obtidos

AMOSTRA	Tipo de Destilação	Condições de pH	DQO			NH3			Condutividade			Cl-			Ácidos Orgânicos		
			Concentrado	Destilado	%Remoção	Concentrado	Destilado	%Remoção	Concentrado	Destilado	%Remoção	Concentrado	Destilado	%Remoção	Concentrado	Destilado	%Remoção
lixiviado fraco	um estágio	ácido (4)	2.250	10,2	94	407	0,8	98	22.000	23	99	—	—	—			
		ácido (4)	1.850	6	97	420	0,8	98	19.500	19	99	4.180	~2	>99			
lixiviado forte		ácido (4)	6.990	39,2	95	3.410	13,4	96	48.000	166	97	9.700	8,5	99		~21	~85
		ácido (4)	9.080	35,7	97	4.060	13,4	97	62.500	128	99	16.900	22,5	99	4.180	~2	>99
		ácido (4,2)	40.400	5.710	~15	1.860	6,7	36									
	dois estágios	base (12)	126.000	68,3	~95	<1	195										
acetato amônia		ácido (4,1)	18.700	5.900	32	639	13,6	~2,0									
		ácido (4,2)	49.600	5.520	12	2.000	5,7	~29									
		ácido (3,2)	20.300	4.740	23,3	279	0,9	32									
		base (8,2)	33.900	29	91,45	7,5	6,5	86,67									
		sem ajuste (8,1)	1.190	14,6	22,69	~0	46,1	—									
lixiviado fraco		sem ajuste (7,7)	57,5	3,2	95	~0	60	—									
		Ácido (4,7)	1.440	22	98,4	314	5,7	98									
		base (10)	100	5,5	99,4	~0	5,7	—									

Fonte: adaptado de Birchler et al., 1994

Birchler cita os trabalhos com evaporação desenvolvidos na Bavária, Alemanha e Suíça.

Na Alemanha destilações em escala de laboratório foram realizadas usando lixiviado nas seguintes condições:

- Com ajuste de pH;
- Sem ajuste de pH;
- Duas fases de destilação de ácido-base em série com ajustes de pH entre a primeira e segunda fase.

Desses experimentos foram tiradas as seguintes conclusões:

- Mais de 95% da NH_3 pôde ser removida na destilação ácida.
- Mais de 80% da demanda química de oxigênio (DQO) ou Carbono Total Orgânico, (COT), pode ser removida com a destilação básica.
- Os lixiviados que não receberam nenhum ajuste de pH apresentam menor eficiência de remoção de ácidos orgânicos e amônia (NH_3).
- De acordo com Konrad, 1989, destilações ácidas e básicas em série são necessárias para remover a amônia presente e os ácidos orgânicos de forma eficaz.

Na Figura 5.4 é apresentado o evaporador utilizado nas destilações feitas na Bavária, Alemanha. Nesse evaporador a amônia foi removida por stripping e o evaporador utilizado era tipo flash com dois estágios.

O lodo concentrado a partir do evaporador flash era desidratado, ensacado e depositado em um aterro sanitário.

Os resultados para a instalação piloto, em grande escala, mostraram que:

- 92% da DQO e 94% da amônia foram removidos (Steinmetzer 1987; Tiefel 1989).
- A remoção de fenóis foi em torno de 50%, e traços de compostos orgânicos voláteis (COV) foram encontrados.

Problemas operacionais incluíram a formação de espumas e incrustações e corrosão. O evaporador piloto tinha uma capacidade para evaporar 3,6 m³/hora de lixiviados e em um período de sete meses em operação a energia requerida foi 31,3 KWh/t de lixiviado.

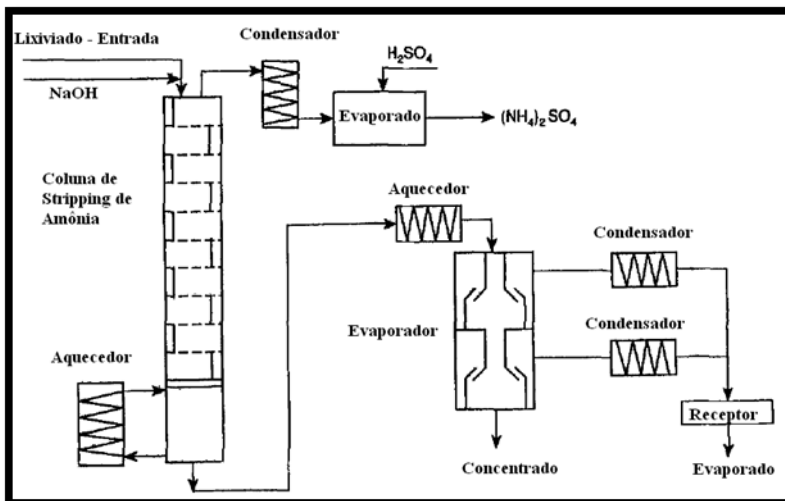


Figura 5.4 - Evaporador piloto instalado na Bavária – Alemanha
Fonte: Marks, et al., 1994

Seguindo a mesma linha de pesquisas a companhia Hofstetter, instalou, na Suíça, um evaporador piloto, semi-contínuo, com capacidade para evaporar 20 m³/d de lixiviados. Esse evaporador utilizava o biogás gerado no aterro sanitário como fonte energética para a evaporação do lixiviado. O lixiviado recebia um pré-tratamento, acidificação com ácido clorídrico (HCl), para manter a amônia no lixiviado líquido depois através do stripping havia a remoção da amônia, o stripping também removia os COV, já o ar dissolvido no lixiviado era removido por um desgaseificador a vácuo.

Após o tratamento prévio o lixiviado resultante era enviado para um evaporador tipo flash de 4 estágios onde se dividia e era encaminhado para 4 condensadores, uma parte do lixiviado condensado era coletado, formando o destilado final e a outra parte era recirculada, retornando ao evaporador novamente e uma parte formava o concentrado final que era descartado e voltava ao aterro sanitário. O processo de evaporação realizava-se em condições de vácuo. A energia para evaporação era fornecida indiretamente pelo gás de aterro, onde uma parte, cerca de 60-70% da energia do vapor condensado também era reaproveitada (Hofstetter et al. 1991, citado por Birchler).

Na Tabela 5.7 é apresentada a qualidade do destilado para 95% do lixiviado evaporado, constata-se que mais de 98,5% da DQO, NH₃, e condutividade foram removidas e a remoção de COV não foi relatada.

Tabela 5.7 - Resultados das evaporação com Evaporador Suíço

Parâmetros	Bruto	Evaporado	Remoção (%)
pH	-	6,5	-
DQO (mg/L)	4,057	64	98,5
DBO ₅ (mg/L)	305	17,4	94,3
NH ₃ (mg/L)	2	9,2	99,5
Condutividade (μS/cm)	12	140	98,8

Fonte: Birchler et al., 1994

O evaporador Suíço apresentou problemas de incrustações devido ao pH ácido e para evitar a corrosão a superfície do evaporador foi revestida com anti corrosivo.

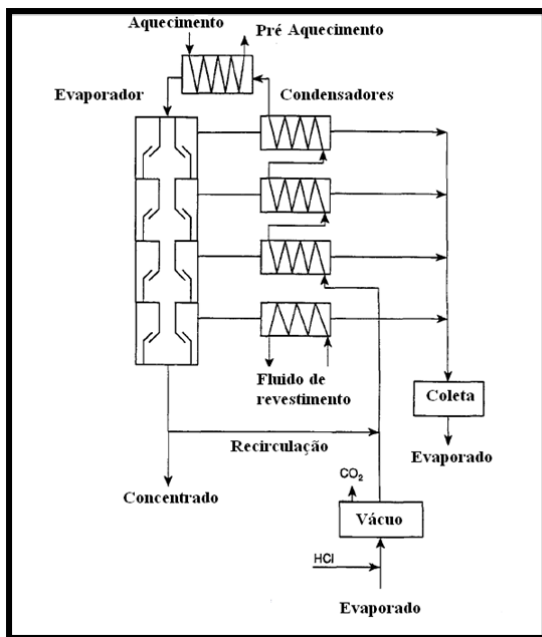


Figura 5.5 - Modelo esquemático do Evaporador Suíço

Modelagens químicas foram realizadas, auxiliadas por computador, para comparar as previsões dos efluentes esperados com os resultados experimentais no intuito de avaliar os requisitos necessários para separar a amônia, NH_3 , e os ácidos orgânicos do condensado produzido.

Os cálculos foram realizados usando um modelo de computador que tinha capacidade para avaliar a amônia e o ácido acético, principais constituintes voláteis nos lixiviados. O programa foi utilizado para avaliar o equilíbrio no líquido, com condições específicas de composição, pH e temperatura.

A separação da amônia e ácidos orgânicos em solução de caráter ácido foi avaliada nas temperaturas de 100 e 60 graus Celsius e em uma faixa de valores de pH mostrados na Figura 5.6 onde também é possível observar as variações previstas nas pressões parciais de amônia e ácidos orgânicos de acordo com o pH e temperaturas respectivas.

Em valores de pH baixos a amônia não é volátil e pode ser separada da água e dos ácidos orgânicos. Da mesma forma, os ácidos

orgânicos não são voláteis em valores de pH elevados e podem ser separada da água e amônia.

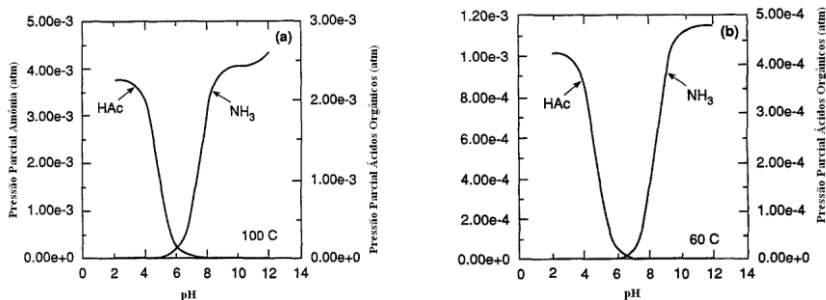


Figura 5.6 - Separação da amônia e ácidos orgânicos (temperatura = 60°C e 100°C)

Em faixas de valores de pH entre cinco e sete, ambas as espécies apresentaram-se bastante voláteis, concordando com os dados experimentais observados por Konrad (1989), que firma a não existência de um único valor de pH, em lixiviados, onde a amônia e os ácidos orgânicos são impedidos de serem carregados para o destilado simultaneamente.

A qualidade dos destilados em lixiviados fortes foi: NH₃ = 578 mg/L e ácidos Orgânicos = 8,800 mg/L. Mesmo em níveis baixos os compostos orgânicos também se fizeram presentes.

A qualidade do evaporado foi modelada considerando-se que na fase de vapor o lixiviado está em equilíbrio com o lixiviado em ebulição para valores diferentes de pH. Para fins de estimativas quantitativas, durante a evaporação a pressão era parcial, assim como o volume de gases eram iguais e os vapores estavam em equilíbrio com a composição inicial de lixiviado.

A Figura 5.6 apresenta as características iniciais dos lixiviados que foram usados na simulação, bem como a qualidade do evaporado para três tipos de destilações diferentes. Os dois primeiros casos estimam a qualidade do evaporado para destilações em um único estagio com o ajuste de pH (de 6,20 para 4,0). Em ambos os casos, esperava-se que os compostos orgânicos voláteis fossem transferidos para o destilado. Em pH = 6,2, o evaporado continha amônia e ácidos

orgânicos, e em pH = 4,0, a amônia foi eliminada, mas os ácidos orgânicos não foram impedidos de serem carreados.

O terceiro caso demonstrado também na Tabela 5.8 representa uma destilação feita em duas fases uma ácida e outra básica. Na fase ácida, o destilado com pH=4 serviu para o estágio seguinte, etapa básica com pH=10. Foi constatado que a amônia residual da primeira fase seria carreada para a segunda, enquanto que praticamente 100% dos ácidos orgânicos seriam removidos.

Tabela 5.8 - Estimativa das diferenças na qualidade do destilado de acordo com o pH

Características do Lixiviado (mg/L)	Bruto	Um Estágio pH= 6,2	Um estágio pH= 4,0	Estágio Duplo pH 4 e 10
NH ₃ -N	578	290	1,7	1,9
Ácidos Orgânicos	8.800	270	6.240	0,034
Tolueno	0,550	0,61	0.61	0,70
Fenóis	74,8	83	83	21

Fonte: Birchler et a.,1994

Nas evaporações com pH entre 6,2 e 4,0, os compostos orgânicos voláteis eram passíveis de sofrer maior carreamento e em pH = 10, somente 28% dos compostos orgânicos voláteis aparecem no evaporado, devido ao equilíbrio químico formado entre fenol/fenolato.

Conclui-se que em duas fases, ácida-básica, a evaporação pode eficazmente remover a amônia e a DQO no caso de um lixiviado forte, onde inicialmente há bastante amônia e ácidos orgânicos. Para haver maior separação de COV a simulação mostrou ser necessária o aumento do pH entre a primeira fase e a segunda fase.

O programa também foi utilizado para avaliar qualitativamente os resultados de destilação de laboratório com lixiviado fraco, onde ambos, NH₃ e ácidos orgânicos estavam presentes em pequenas quantidades. As quantidades eram: Amônia = 43,4 mg/L e Ácidos Orgânicos = 16 mg/L. Além desses parâmetros haviam outros obtidos com a caracterização do lixiviado que são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 5.9 - Caracterização dos lixiviados Fracos

Parâmetros	Lixiviado
pH	6,77
Na (meq/L)	251
K (meq/L)	69,9
Ca (meq/L)	184
Mg (meq/L)	75
Al (meq/L)	0,38
Cl (meq/L)	451
F (meq/L)	0,38
NO ₃ (mg/L)	2,28
SO ₃ (mg/L)	2
SO ₄ (mg/L)	271
CO ₃ (mg/L)	408
Fenol (mg/L)	0,198
Tolueno (mg/L)	0,005
Metil-Cetona	0,1

Na simulação, H₂SO₄ foi utilizado para ajustar o pH (4), e a temperatura de ebulição foi especificada em 100 °C. A simulação do equilíbrio vapor-líquido para a composição inicial dos lixiviados, assumindo volumes iguais de gases e líquidos, mostraram que a evaporação deve ser essencialmente livre de sais de amônia e ácidos orgânicos, menos de 1 mg/L. Estas conclusões estão de acordo com os resultados laboratoriais em fase única de evaporação descritas anteriormente nos trabalhos de Birchler, 1994, onde a destilação de um lixiviado fraco em fase ácida deve produzir um evaporado relativamente limpo em termos de amônia e ácidos orgânicos, exceto para os COV e sulfeto de hidrogênio, se houver, pois estes podem requerer tratamento adicional, como air- stripping.

A modelagem química mostrou que existe um dimensionamento ideal onde superfícies sujas diminuem o rendimento térmico durante as trocas de calor no evaporador. Quando o pH foi ajustado com ácido sulfúrico, era previsto que o CaSO₄ (como CaSO₄-2H₂O e CaSO₄-0.5H₂O) precipitasse. No entanto, quando a simulação foi realizada utilizando HCl para o ajuste de pH, não foram previstos para precipitar e a qualidade do evaporado continuava sendo a mesma.

Em resumo, as previsões a partir da modelagem do equilíbrio químico comparados com os experimentos de destilação em escala laboratorial para lixiviados fracos e fortes pode-se concluir que:

- Em evaporações com lixiviados fracos um único estágio foi suficiente para manter a qualidade do condensado em relação à amônia e ácidos orgânicos.
- Para um lixiviado forte ha a necessidade da utilização de evaporações em dois estágios, ácido – base, para formar um bom destilado.
- O ajuste de pH não apresentou nenhum efeito direto sobre a volatilidade do tolueno (COV) e outros compostos orgânicos voláteis e o mesmo foram transferidos para o destilado
- Para obter um produto de alta qualidade sem COV torna-se necessário a adoção de um pré-tratamento (Air stripping).

5.2.2. Considerações Finais por Birchler et al .,1994

Em suas considerações finais Birchler concluir que:

- Há pouca informação sobre evaporação e/ou destilação de lixiviados publicadas.
- Em experimentos de destilação, em escala de laboratório, três amostras de chorume de aterros antigos mostraram que;
- Em um estágio único, ácido, de evaporação de mais de 95% de lixiviado, impurezas iônicas nos lixiviados fortes foram retirados e as amostras destiladas eram praticamente sem cor.
- A remoção de ácidos orgânicos voláteis apresentou-se na faixa de 85%;
- Em testes com fase única a destilação ácida produz uma alta qualidade de destilado, com baixos níveis de ácidos;
- Experimentos simulados em computador, de destilação com lixiviados forte, que continha altas concentrações de NH₃ e ácido acético, mostraram que não houve nenhum valor de pH ótimo onde a amônia e os ácidos orgânicos foram impedidos de serem carreados para o destilado.

- Em processo de dois estágios haveria a possibilidade eliminar totalmente a amônia e os ácidos orgânicos somente com o uso de stripping.

Uma análise feita da estimativa da auto-suficiência do biogás em aterro sanitário para evaporar o lixiviado demonstrou que para usar o de biogás de aterro como fonte de energia para evaporar o lixiviado, controles de engenharia precisam ser desenvolvidos para auxiliar no equilíbrio da produção de lixiviados e da produção de metano.

5.3. Tratamento de lixiviado de aterro industrial, por meio da evaporação e da osmose reversa (Di Palma et al., 2002)

Di Palma et. al, 2002, propôs, através de testes experimentais, o tratamento de lixiviados de aterros sanitários industriais, usando processos combinados de evaporação, em condições de vácuo e osmose reversa

Baseado em diversas bibliografias, o autor destacou em seu trabalho que o uso da Osmose Reversa na maioria dos casos constitui a ultima fase do tratamento de efluentes, e que lixiviados de aterros sanitários industriais apresentam altas concentrações de amônia, compostos orgânicos e metais pesados que influenciem diretamente o tratamento.

No estágio da evaporação os autores obtiveram a concentração de poluentes, amônia, metais pesados e compostos orgânicos, no condensado e dessa forma a diminuição do teor de liquido na etapa de osmose reversa.

Ao adotar a fase de evaporação anterior a fase de osmose reversa obteve-se a diminuição do volume a ser tratado na osmose reversa e um destilado com uma concentração menor de poluentes, ou seja, um efluente de melhor qualidade diminuindo o gasto energético na etapa da osmose reversa. Para que a amônia permanecesse no concentrado e não fosse carregada para o evaporado o pH foi ajustado.

Evaporações com amostras de 250 ml foram realizada a temperaturas de 40°C em três ensaios com três pressões diferentes, 400 mmHg (0,52 atm), 45 mmHg (0,059 atm) e 20 (0,027) mmHg respectivamente, em um evaporador rotativo para garantir uma boa mistura. O destilado da evaporação realizada na na pressão de 45 mmHg foi coletado e tratado por Osmose Reversa.

5.3.1. Resultados obtidos por Di Palma et al, 2002

Com relação à amônia foi verificado que em pH entre 6 e 10 apresentava-se a faixa ótima para fixar a amônia no concentrado no evaporador a vacuo.

Para realizar os testes de evaporação o lixiviado foi caracterizado e o resultado desta caracterização é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Caracterização do Lixiviado Bruto

Parâmetro	Unidade	Valor
COD	mg/l	19,900
BOD ₅	mg/l	4000
TOC	mg/l	5244
Conductivity	μS/cm	79,800
pH	—	8
Density	kg/dm ³	10,552
Na ⁺	meq/l	1012
K ⁺	meq/l	39.6
Mg ²⁺	meq/l	186.3
Ca ²⁺	meq/l	1.08
Ba ²⁺	meq/l	3.43
NH ₄ ⁺	meq/l	217.6
F ⁻	meq/l	10.07
Cl ⁻	meq/l	1293
Br ⁻	meq/l	0.71
SO ₄ ⁼	meq/l	6.05
Cu ²⁺	meq/l	0.032
Cr ³⁺	meq/l	0.013
Fe ³⁺	meq/l	0.18
Pb ²⁺	meq/l	0.02

Onde: COD = DQO, BOD₅=DBO₅, TOC=COT

Na Figura 5.7 e Figura 5.8 são apresentados os resultados do volume de destilado produzido em função do tempo e a variação do COT, nas duas fases das evaporações realizadas com as amostras de 250

ml de volume, temperatura de 40°C e pressão de 400 mmHg e 20 mmHg respectivamente.

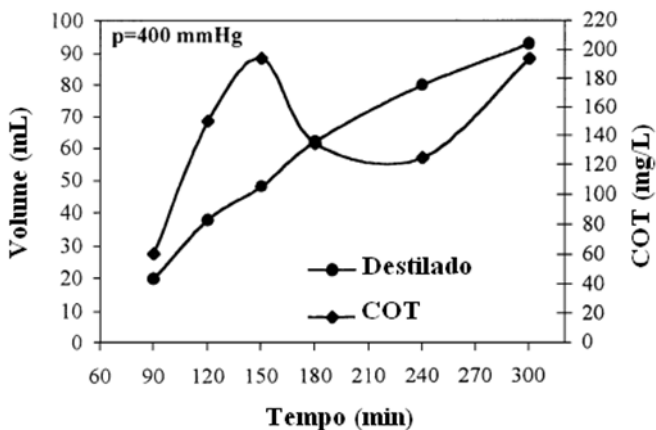


Figura 5.7 - COT e Volume do destilado em função do tempo (P=400 mmHg)

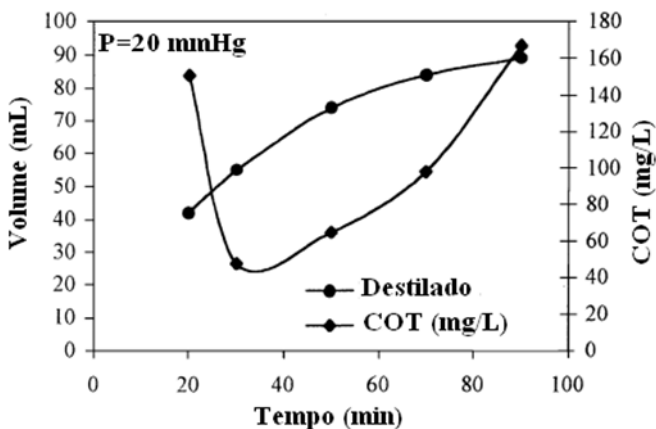


Figura 5.8 - COT e Volume do destilado em função do tempo (P=20 mmHg)

Na evaporação com pressões iguais a 400 mmHg a evaporação foi lenta, os compostos orgânicos voláteis sofreram stripping

rapidamente e o destilado, já em pequenas frações apresentava altos valores de COT.

Logo após com a evaporação da parte líquida o volume do destilado coletado aumentou e o teor de matéria orgânica no destilado diminuiu atingindo o ápice mais baixo quando 75% do destilado haviam sido recolhidos após com a evaporação de compostos orgânicos mais pesados um novo incremento na concentração de COT foi observado.

As diferenças de pressões aplicadas acarretaram em uma pouquíssima diferença na produção de destilado. Em pressões iguais a 45 mmHg, 70% do destilado foi produzido em torno de 50 minutos à uma hora e em pressões iguais a 20 mmHg a diferença de tempo para a mesma alíquota de destilado produzido levou poucos minutos a menos para ser produzido. Dessa forma como alternativa mais econômica e com a mesma eficiência a melhor pressão é a de 45 mmHg

A Tabela 5.11 seguinte apresenta a caracterização do destilado, com pH de aproximadamente 9,5, e do concentrado.

Tabela 5.11 - Caracterização do Destilado e do Concentrado

Parâmetro	Unidade	Condensado	Destilado
COD	mg/l	78,000	200.5
TOC	mg/l	20,640	53.1
Na ⁺	meq/l	5783	0.18
K ⁺	meq/l	121	—
Ca ²⁺	meq/l	58	—
NH ₄ ⁺	meq/l	733	33
F ⁻	meq/l	45	0.3
Cl ⁻	meq/l	5550	28
Br ⁻	meq/l	2	—
SO ₄ ⁼	meq/l	4	0.04
Cu ²⁺	meq/l	0.25	—
Cr ³⁺	meq/l	1.4	—
Fe ³⁺	meq/l	4.25	—
Pb ²⁺	meq/l	0.08	—

Onde: meq/L = Miliequivalente por litro

O destilado obtido com as evaporações nas pressões de 40 e 45 mmHg respectivamente foram submetidos ao tratamento por osmose reversa.

5.3.2. Considerações finais apresentadas por Di Palma et al., 2002

O processo de evaporação acoplado ao processo de osmose reversa alcançou um efluente final de melhor qualidade.

Em temperaturas de 40°C e a pressões de 45 mmHg, foi possível obter um destilado com 1% de compostos orgânicos e 20 % de amônia, ou seja, conseguiu-se um destilado de alta qualidade.

5.4. Tratamento combinado de lixiviados por processos de membrana e evaporação forçada, Giust e Del Piccolo, 2007

Giust e Del Piccolo, 2007, trataram da problemática do tratamento de lixiviados de aterros sanitários na França, em seus trabalhos realizados durante o ano de 2007. O lixiviado gerado neste aterro apresentava duas características distintas:

Um lixiviado proveniente de um aterro sanitário velho, já desativado e outro lixiviado novo, do aterro que estava em operação na época.

O tratamento escolhido para tratar esses dois tipos de lixiviados, tão diferentes, foi à osmose reversa em conjunto com um sistema de evaporação forçada que objetivavam o aproveitamento do próprio biogás do aterro para realizar a evaporação do lixiviado.

5.4.1. Resultados e Discussões Obtidos por Giust e Del Piccolo, 2007

O aterro sanitário recebia em média 10.000 toneladas de resíduos por ano, estima-se que 60% dos resíduos eram urbanos, 28 % industriais e 2% resíduos da construção civil.

O lixiviado era coletado por duas lagoas de 4500m³ de capacidade o biogás produzido era cerca de 800Nm³/h e com cerca de 45% de metano.

Tabela 5.12 - Composição do lixiviado bruto: aterro antigo

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média
pH		8,0	8,4	8,1
Sólidos em suspensão	mg / l	10	510	16
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg / l O ₂	251	629	314
Oxigênio (CBO)	mg / l O ₂	10	38	13
DBO / DQO		3%	6%	4%
Condutividade	S / cm	3796	6795	4295
Cloretos	mg / l Cl	530	5500	960
NH ₄ ⁺	mg N / l	102	234	118
Total de metais pesados	mg / l	2,9	5,1	3,6

A baixa relação DBO/DQO (neste caso abaixo do que 0,5) indica que o lixiviado é velho e com baixa biodegradabilidade, em contrapartida a caracterização do lixiviado novo indicado na Tabela 5.13 indica uma relação DBO/DQO alta e exemplifica que lixiviados novos são mais biodegradáveis que lixiviados velhos.

Tabela 5.13 - Caracterização dos lixiviados novos

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média
pH		6,2	7,6	7,2
Sólidos em suspensão	mg / l	53	150	137
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg / l O ₂	290	1770	920
Oxigênio (CBO)	mg / l O ₂	198	1190	506
DBO / DQO		68%	67%	55%
Condutividade	S / cm	1860	5505	4935
Cloretos	mg / l Cl	284	5300	3300
NH ₄ ⁺	mg N / l	31	185	118
Total de metais pesados	mg / l	0,2	1,0	0,8

Concernente a etapa de evaporação a escolha desta tecnologia evaporativa para tratar os lixiviados do aterro sanitário foi feita de modo o efluente final pudesse atingir os padrões de lançamento de efluente e

também por ser uma técnica flexível quanto à vazão de lixiviado a ser tratado. O esquema utilizado no tratamento de lixiviado por Giust e Del Piccolo é esquematizado a seguir:

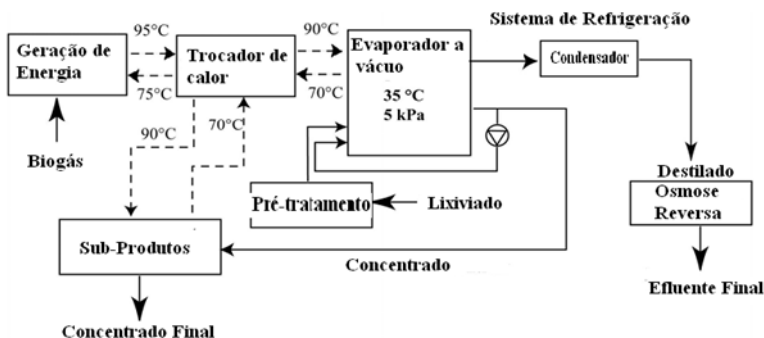
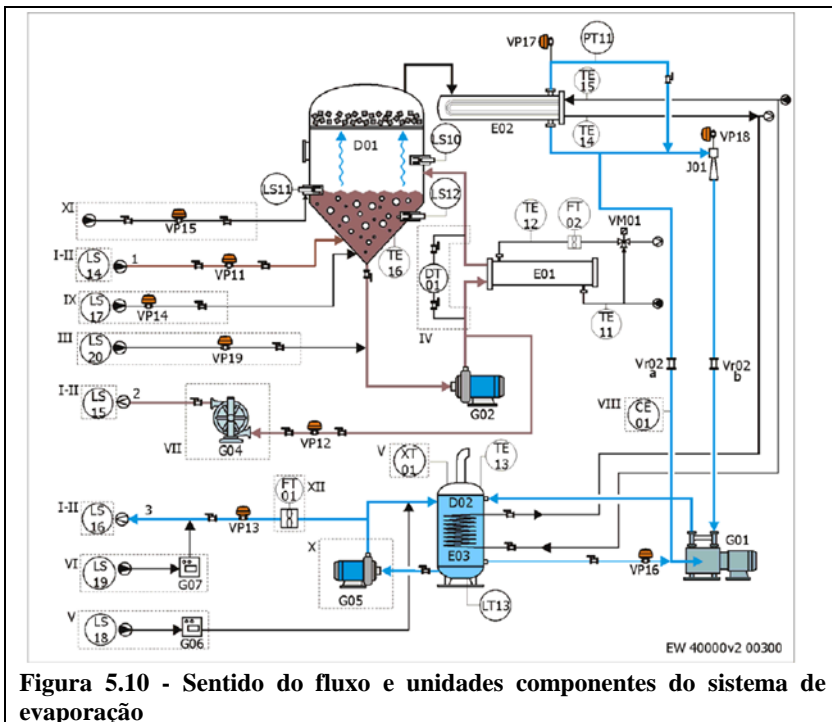


Figura 5.9 - Sistema de evaporação utilizado por Giust et al., 2007

O tratamento por evaporação exigiu que o lixiviado recebesse um pré-tratamento antes de ser evaporado composto por ajuste de pH e desgaseificação

A importância da desgaseificação é a mesma da etapa de osmose reversa, no entanto o pH ótimo para etapa de evaporação ficou em torno de 5 a 5,5 (ácido) que além de não emitir a volatilização da amônia ajuda regredir as ações de incrustação e corrosão.

A etapa de evaporação para formação do concentrado é apresentada na Figura 5.10 a seguir:



O processo iniciava-se com o lixiviado sendo sugado para dentro da câmara de evaporação devido à condição de vácuo criado pelo princípio de Venturi, como resultado do vácuo uma parte do lixiviado já entra imediatamente em ebulição, evaporação tipo flash. O condensado formado era refrigerado e pela condição de vácuo havia a formação do destilado que seguia para a etapa de osmose reversa.

O evaporador trabalhava com um rendimento de 93% e produzia cerca de 2,5 toneladas de concentrado que seguia para outra etapa de evaporação para formar uma pasta, com um menor teor de líquido, denominada de super concentrado.

O superconcentrado formado na segunda etapa de evaporação tinha o objetivo de concentrar mais o efluente concentrado gerado na fase anterior.

Como na fase anterior o vácuo é o responsável pela entrada do concentrado na câmara de evaporação. Na parte inferior da câmara havia

um trocador de calor responsável pela evaporação da parte líquida restante do concentrado da fase anterior de evaporação.

O vapor produzido nesta etapa era coletado, condensado e o destilado seguia juntamente com o destilado da etapa de evaporação anterior para o tratamento por Osmose Reversa.

Um raspador de lodo elétrico fazia a raspagem e limpeza das paredes do trocador de calor e ajuda na produção de um concentrado semi-sólido.

O processo de evaporação era realizado em batelada, o acionamento do processo dava-se através do nível de concentrado existente na câmara e a retirada do superconcentrado na câmara era retirado pelo mesmo processo de nível de superconcentrado na câmara.

A temperatura era controlada assim como a vazão e através de um balanço de massa entre vazão e quantidade de calor fornecida ao sistema obteve-se que o rendimento da unidade era em torno de 80 a 85 % produzindo cerca de 0,3 toneladas de superconcentrado por dia com um teor de sólidos totais em torno de 70-75%.

5.4.2. Resultados alcançados por Giust e Del Piccolo, 2007

Após um ano de operação não houve problemas operacionais significativos, além dos esperados, de manutenção prevista para os sistemas.

- A unidade tinha somente duas saídas de efluentes para descarte:
- Líquido resultante permeado da osmose reversa e,
- Descarga de lodo concentrado da segunda etapa de evaporação.

Fazendo uma análise geral da produção de sob produtos do sistema conclui-se que há uma recuperação total do efluente de aproximadamente 99%, pois por dias estima-se uma entrada de lixiviado em torno de 60-65 toneladas por dia e uma saída de apenas 300 kg de super concentrado.

Custos Operacionais

Na Tabela 5.14 são apresentados os custos de operação dos sistemas utilizados.

Tabela 5.14 - Custos operacionais dos sistemas utilizados estudados por Giust e Del Piccolo, 2007

Características	Unidade.	Valor Operação
A energia elétrica	€ / kWh	0,06
O consumo de energia	kWh/m ³	35
Custo da energia	€ / m ³	2,1
Produtos químicos	€ / m ³	3,5
Manutenção	€ / m ³	1,3
Custo para Conc. Eliminação	€ / ton	300
Quantidade de conc. Para eliminar	Ton / dia	0,3
Custo por tonelada para a eliminação dos lixiviados	€ / ton	1,5
Total	€ / ton	8,4

Como o biogás era reaproveitado o consumo total de energia externa foi diminuído e conseqüentemente os custos também.

5.4.3. Considerações Finais por Gisut e Del Piccolo, 2007

A experiência do aterro no norte de Paris mostra que as técnicas de tratamento com membranas acopladas a processos de evaporação de lixiviados produziram um efluente final com excelente qualidade e produz uma quantidade relativamente pequena, em comparação com o volume de entrada, de produtos que necessitam de um descarte final em aterros sanitários.

5.5. Tratamento por evaporação de lixiviado em escala piloto , Ettala, 1998.

Ettala, 1998, estudou o processo de evaporação aplicada a um aterro Finlandês.

A evaporação deva-se através de um filme plástico que servia de base para a ocorrência da transferência de calor e conseqüentemente evaporação do lixiviado (Figura 5.11).

O uso do filme tornou-se possível devido à faixa de temperatura de operação ser em torno de 50-60°C e a pressão de funcionamento estar entre 0,12 – 0,2 bar.

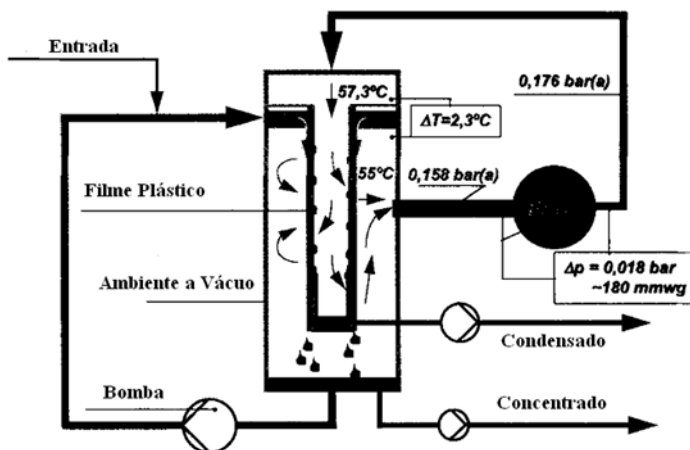


Figura 5.11 - Diagrama Simplifica do Evaporador utilizado por Ettala, 1998

As pressões baixas permitiram o uso de ventiladores no lugar de compressores diminuindo os custos energéticos.

O sistema de evaporação, Figura 5.12 utilizado por Ettala necessitava de um pré-tratamento composto por:

- Filtração: composta por leito de areia para remoção de sólidos
- Ajuste de pH: o pH ótimo era em torno de 4 para evitar a mudança de fase líquida para fase gasosa da amônia, para ajustar o pH era utilizado ácido sulfúrico.
- Remoção de CO₂ através de stripping.

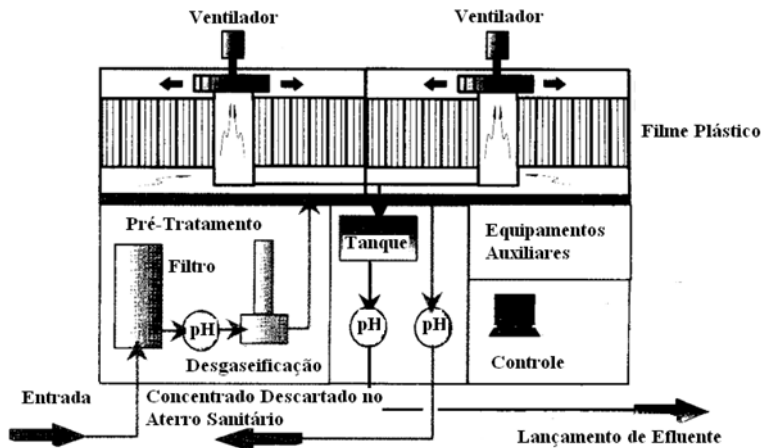


Figura 5.12 - Esquema do evaporador em planta, utilizado por Ettala, 1998

5.5.1. Resultados e Discussões apresentados por Ettala, 1998

O evaporador foi dimensionado e projetado para trabalhar com uma vazão de 130 m³/d. A previsão era de que houvesse a formação de cerca de 40.000m³/ano. O tamanho do evaporador era:

10,5X5,0 metros de largura e 5,6 metros de altura. A área do trocado de calor, ou seja, do filme plástico era igual a 1.500 m².

Para manter o pH do condensado em torno de 7 a soda caustica era utilizada antes que o destilado sofresse a mudança de fase e também antes do destilado ser descarregado no meio ambiente.

No tratamento do lixiviado do aterro Finlandês o efluente final saiu com uma concentração de Amônia, NH₄, em torno de 2 mgN/L e DQO próximo a 30 mg O₂/L. E o concentrado produzido saiu com alto teor de sólidos e o mesmo foi disposto no aterro sanitário.

No entanto quando eram evaporados lixiviados ricos em ácidos graxos voláteis a DQO do efluente final tinha um aumento significativo. A Tabela 5.15 apresenta a caracterização do lixiviado na entrada e na saída do sistema.

Tabela 5.15 - Caracterização do lixiviado no sistema de evaporação -

Parâmetro	Unidade	Entrada			Saída		
		Medido	Média	Numero de amostras	Medido	Média	Numero de amostras
Condutividade	mS/m	360	362	11	4.2	2.8	11
pH		7.7	7.8	11	7.7	7.5	11
DQO	mg O ₂ /L	228	230	11	<30	<30	11
DBO	mg O ₂ /L	27		1	<3	<3	3
Amônia	mg N/L	101	100	11	0.63	0.23	14
Ácidos Orgânicos	mg /L	0.077		1	<0.005	–	1
Sólidos Dissolvidos	mg /L	2,063		8	10	–	2
Sólidos Suspensos	mg /L	46	53	7		–	0

O evaporador apresentou um consumo baixo de energia; quando a temperatura do lixiviado era em torno de 5°C, inverno, o consumo era de 13 KWh/m³. No entanto o consumo de energia era diminuído quando o ácido clorídrico é utilizado na superfície do filme à energia requerida para realizar a evaporação foi menor.

Durante a etapa de teste uma vazão de 115 m³/d foi alcançada, estando dentro dos padrões previstos. No entanto devido a uma precipitação de carbonato de cálcio e o volume do concentrado obtido ficou duas vezes maior que o esperado.

Anti-corrosivos e anti formadores de espumas também foram utilizados e o volume do concentrado foi cerca de 18 % do volume do efluente de entrada.

O volume do concentrado pode ser minimizado com a adição ácido clorídrico para ajustar o pH.

Outros problemas operacionais como interrupção no fornecimento de energia também prejudica o funcionamento do evaporador, problemas na bomba de dosagem de ácido para regular o pH e o controlador do nível de lixiviados também foram detectados, no entanto a técnica se consagrou viável quando comparada com outras técnicas apresentando um custo de 5 dólares/m³ de lixiviado tratado.

Observou-se que o tratamento de lixiviados para vazões pequenas apresenta um custo unitário mais elevado do que tratar grandes vazões de lixiviados. Os custos detalhados do sistema de evaporação por unidade são apresentados na Tabela 5.16

Tabela 5.16 - Custos detalhados do evaporador utilizado por Ettala, 1997

Item	Consumo/m ³ de efluente tratado	Preço em dólares	Preço unitário (dólares/m ³)
Eletricidade	12 kWh	0.06/kWh	0,72
Correção de pH - Á	1.5Kg	0.20/Kg	0,3
Correção de pH - Á	0.58Kg	0.60/Kg	0,35
Limpeza	0.23Kg	0.66/Kg	0,15
Controle da corros	0.05Kg	2.4/L	0,12
Controle da incrus	0.003Kg	4.0/L	0,01
Operação	0.02h	16/h	0,32

5.5.2. Resultados e Discussões apresentados por Ettala, 1998

A tecnologia é viável e o efluente final apresentou uma excelente característica, o custo total apresentou-se menor do que quando comparado com outras tecnologias e o biogás do próprio aterro sanitário pode ser utilizado para fornecer energia ao sistema

5.6. Processos de tratamento combinados de ultra filtração e evaporação, Xu, Yue e Nie, 2006.

Xu et al., 2006 usaram em seus experimentos um lixiviado antigo, oriundo da cidade chinesa de Beijing. Para tratar o lixiviado foram utilizados dois processos combinados: ultra filtração e evaporação forçada.

O aterro sanitário de Pequim estava em funcionamento desde 1997 e apresentava uma área de 32,5 ha e um volume total de aterro sanitário igual a 4.630.000m³, recebendo cerca de 1.200 toneladas por dia de resíduos e por ano eram gerados aproximadamente 73.000 m³ de lixiviados.

5.6.1. Metodologia utilizada por Xu et al., 2006

- Separação da matéria Orgânica

A resina XAD – 8 e XAD - 4 foram limpas e preparadas em colunas e conectadas em série por tubos de teflon. 20 milímetros de lixiviado foram filtrados através de uma membrana de fibra de vidro para remover os sólidos em suspensão. O filtrado foi acidificado para pH igual a 1 com ácido clorídrico concentrado e as amostras ficaram em repouso para promover a precipitação de ácidos húmicos que pudessem se fazer presentes.

O sobrenadante foi recolhido, centrifugado e teve seu pH ajustado para 2 com o uso de hidróxido de sódio a 5 N. Em seguida foi bombeado passando através da coluna com as resinas XAD.

- Tamanho da matéria orgânica

O tamanho das partículas foi determinado através de ultra filtração. O gás nitrogênio foi utilizado para pressurizar à célula de ultra filtração. As amostras estavam em pH ambiente e as alíquotas de lixiviado passavam por cada célula de ultra filtração. O permealto final sofreu análise Carbono orgânico dissolvido e Absorbância UV.

Teste da Membrana de Ultra-Filtração

A membrana utilizada na ultra filtração foi testada para avaliar a influencia dos diversos parâmetros que pudessem afetar o seu funcionamento tais como: pH, taxa de filtração e condutividade. Os testes da membrana foram realizados em uma temperatura ambiente (25 ± 5 °C).

A caracterização do lixiviado ocorreu antes e depois das duas fases do tratamento.

- Testes de Evaporação

Testes de evaporação foram realizados para avaliar a máxima redução de água, concentração de sólidos dissolvidos e capacidade de desinfecção, para utilizar o concentrado como fertilizante, no sistema de evaporação.

O lixiviado utilizado na evaporação era proveniente da etapa de ultra filtração as amostras de concentrado e condensado foram levados para análise no final da etapa de evaporação.

5.6.2. Resultados e Discussões apresentados por Xu et al. 2006

- Separação da matéria Orgânica

A resina XAD foi utilizada para isolar a matéria orgânica:

Foram isolados: a fração solúvel e insolúvel como substâncias húmicas (HA). Ácidos fúvicos, carboxílicos e fenóis (FA), Ácidos orgânicos e alifáticos (HIA) Frações maiores como proteínas, polissacarídeos (HON).

Os resultados mostraram que a fração solúvel apresentava 64 % da matéria orgânica, os ácidos fúvicos apresentavam 4% e as frações maiores e os ácidos orgânicos e alifáticos representavam respectivamente 21% e 11%.

- Ultra filtração

Nos testes realizados em laboratório o principal fator que influenciou na eficiência da membrana foi a condutividade, onde o aumento da mesma diminuiu a eficiência da membrana.

Nos experimentos de ultra filtração em laboratório a primeira fase foram realizados com lixiviado bruto e a segunda etapa foi realizada com o permeado da primeira etapa de ultra filtração. O fluxo na primeira etapa era igual a $6,81/m^2 \cdot h$.

Foi realizado um balanço de massa em cada etapa de ultra filtração e foi comprovado que a perda total no sistema é menor do que 10%.

Um aumento de pH ocorreu durante as ultra-filtrações devido ao stripping de CO₂ durante o tratamento.

O stripping de CO₂ também contribuiu para a elevação do pH no permeado. Quando comparado com o lixiviado bruto o permeado reduziu cerca de 57% da matéria orgânica (COT). Após duas ultra-filtrações o volume de efluente retido nas membranas foram cerca de 4% da amostra inicial.

- Evaporação

O segundo lixiviado que ficou retido na membrana apresentava altos teores de HS e TDS. No entanto o mesmo apresentava baixos teores de matéria orgânica (COT).

Em experimentos laboratoriais a evaporação foi empregada para avaliar a redução do efluente retido na membrana proveniente da segunda etapa de ultra filtração. Cerca de 90 % do volume foi reduzido. No entanto a matéria orgânica foi segregada juntamente com os materiais inorgânicos. A Tabela 5.17 apresenta a caracterização do concentrado resultante da evaporação.

Tabela 5.17 - Composição do concentrado de evaporação

Parâmetros	Conteúdo	Limites	
		China	EUA
Ácidos Húmicos (wt.%)	11.8	> 8,0	-
Sólidos Secos (wt.%)	25.1	> 20	-
A matéria orgânica (carbono) (wt.%)	31.9	> 10	
Fe (mg kg ³ ¹)	1786	-	-
Mn (mg kg ³ ¹)	66.4	-	-
Co (mg kg ³ ¹)	31.5	-	-
Como (mg kg ³ ¹)	12.8	75	75
Cr (mg kg ³ ¹)	62.4	1000	3000
Cu (mg kg ³ ¹)	1.9	1500	4300
Ni (mg kg ³ ¹)	142.7	200	420
Pb (mg kg ³ ¹)	2.9	1000	840
Zn (mg kg ³ ¹)	37.3	3000	7500

O destilado apresentou baixa concentração de matéria orgânica expressa em COT (31 mg L-1). Também se fizeram presentes baixas concentrações de compostos inorgânicos e em relação a metais estes se apresentaram em quantidades insignificantes.

No condensado o nitrogênio amoniacal apresentou-se em altas quantidades (1.660 mg L-1). Caracterizando um condensado com pH básico. Os teores de matéria orgânica e sólidos totais dissolvidos no concentrado foram próximos a 13% e 25 % respectivamente.

A análise de matéria orgânica e sólidos no concentrado demonstrou que a ultra filtração acoplada ao processo de evaporação pode ser uma técnica viável de tratamento de lixiviados.

A proporção de matéria orgânica em DTS no concentrado foi cerca de 52 % do peso em comparação com a de 19 % do lixiviado bruto, a matéria orgânica concentrada consistia basicamente em substância húmicas e componentes inorgânicos. Os metais pesados fizeram-se presentes em quantidades abaixo dos limites exigidos pela legislação no concentrado.

Quanto aos problemas operacionais dois problemas ocorreram; a formação de espuma e corrosão.

5.7. Testes de evaporações para desenvolvimento de um sistema de evaporação por combustão submersa, Yue et al., 2007.

Para simular um processo de evaporação de combustão submersa em laboratório, Yue et al em seus estudos realizaram evaporações forçadas utilizando três tipos experimentos de evaporação por aquecimento indireto sob diversas condições de pH:

- Evaporação a pressão normal (1 atm)
- Evaporação a vácuo (375 mmHg)
- Evaporação por arraste de gás

Os processos de evaporação foram precedidos e combinados com processos de biorreatores de membranas e osmose reversa e o aterro sanitário em questão localizava-se na China em Pequim.

5.7.1. Metodologia utilizada por Yue et al., 2007

O lixiviado utilizado era proveniente de um aterro sanitário em Beijing na China que se encontrava em operação desde 1997 e recebia cerca de 1200 toneladas de resíduos sólidos por dia.

A Figura 5.13 mostra o aparato experimental de evaporação que consistia em um balão volumétrico e uma chapa aquecedora de baixa tensão, para evitar que o lixiviado evaporasse rapidamente.

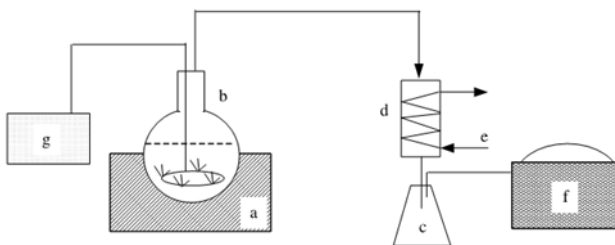


Figura 5.13 - Aparato experimental de evaporação

As evaporações a vácuo ocorreram com o uso de um evaporador rotativo conectado a uma bomba de vácuo, a temperatura média do lixiviado era em torno de 100°C e os valores de pH foram 4,0, 5,0, 7,0 e 8,0.

Para as evaporações por arraste de ar os valores de pH considerados foram 4,0, 7,0, 8,0 e 9,0 e a temperatura de operação era de 25 °C. Uma bomba liberava ar através do lixiviado e o fluxo de ar era igual a 0,2 m³/hora. Os experimentos usaram alíquotas de 500 mL por evaporação.

A razão de evaporação foi definida através da equação:

Onde:

V_i e V_f eram os volumes iniciais e finais de condensados e de amostra bruta respectivamente.

A razão de evaporação em termos de DQO foi determinada pela equação:

Onde:

C_i e C_f são as concentrações iniciais e finais de DQO no condensado, e no lixiviado bruto respectivamente,

O Fator de Concentração (CF) é calculado pela equação:

Para separar os compostos orgânicos a resina XAD foi utilizada, os ácidos fúlvicos e compostos hidrofóbicos ficaram retidos na resina.

5.7.2. Resultados e discussões apresentadas por Yue et al. 2007

Na Tabela 5.18 é apresentado os valores obtidos na caracterização do lixiviado bruto:

Tabela 5.18 - Composição do lixiviado bruto utilizado nos experimentos

Parâmetro	Unidade	Valor
pH	-	7.8
COD	mg / l	3040
DBO / DQO	-	<0,1
TDS	g / l	10.46
FDS	g / l	8.13
NH ₃ -N	mg / l	1230
Alcalinidade (como CaCO ₃)	mg / l	16667
Como	mg / l	0.053
Co	mg / l	0.034
Cr	mg / l	0.11
Cu	mg / l	0.063
Ni	mg / l	0.11
Pb	mg / l	0.018
Zn	mg / l	0.071
Fe	mg / l	2.31
Mn	mg / l	0.36

A relação DBO/DQO foi baixa, o pH foi básico e a amônia se fez presente em altas concentrações.

A Figura 5.14 apresenta a distribuição dos compostos que se fizeram presentes no lixiviado bruto:

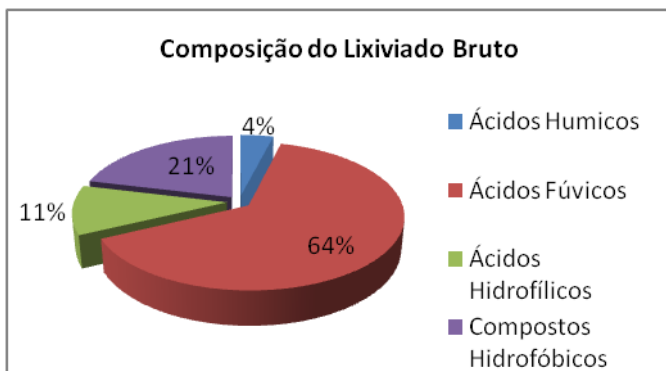


Figura 5.14 - Compostos presentes no lixiviado bruto

Em testes de evaporação normal, a DQO no condensado foi baixa devido à vaporização rápida dos compostos orgânicos voláteis e devido à estabilização de evaporação das substâncias húmicas (Figura 5.15).

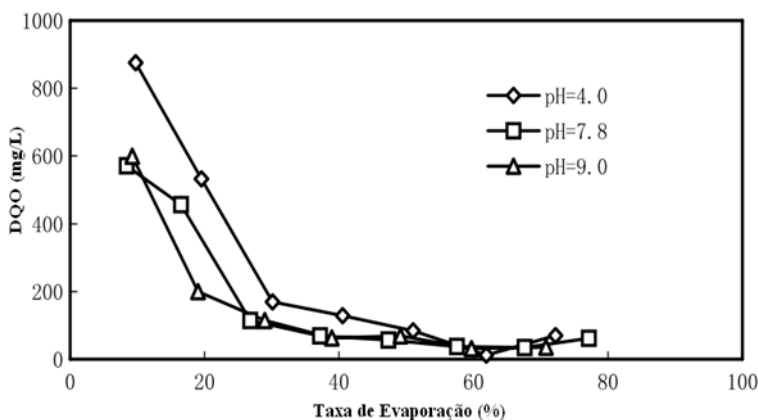


Figura 5.15 - Variação da DQO no Condensado em função da taxa de evaporação (Pressão de 1 atm)

Devido ao aumento da evaporação a DQO diminuiu rapidamente e os valores ficaram abaixo de 300 mg/L quando o estágio de evaporação estava acima de 25%.

A Figura 5.16 mostra o aumento acentuado da DQO no decorrer do aumento taxa de evaporação, cerca de 20%. Posteriormente, o aumento da DQO atingiu o pico mais alto quando a taxa de evaporação estava em 75%, para um pH igual a 4,0. A maior parte da matéria orgânica ficou retida no concentrado.

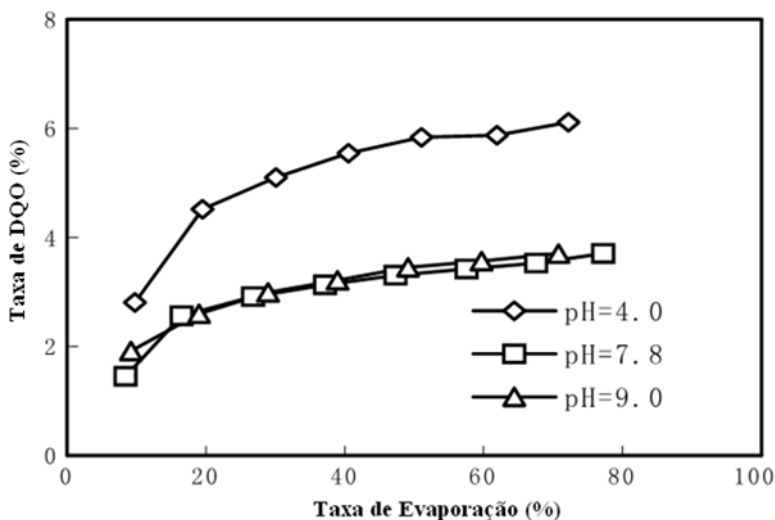
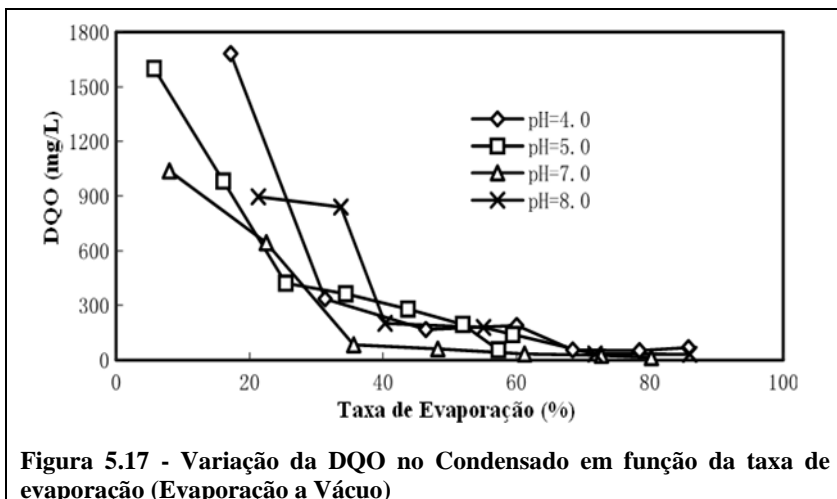


Figura 5.16 - Taxa de DQO em Função da taxa de Evaporação (Pressão de 1 atm)

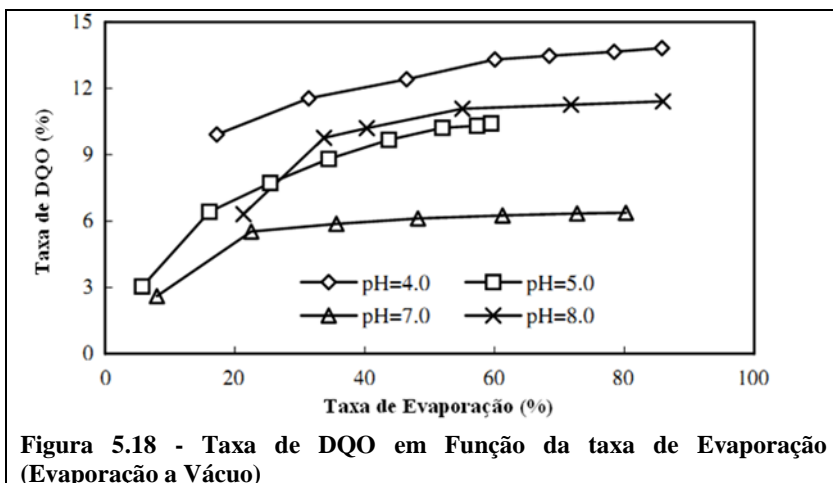
Analisando as Figura 5.15 e Figura 5.16 verifica-se que a DQO esse fez presente em maior parte no condensado na condição ácida porque as maiorias dos compostos orgânicos voláteis estavam na forma de íons e não na forma de moléculas como ocorre nas condições básicas.

Semelhante a evaporação em pressão normal os COV apresentaram-se em maior concentração no início da evaporação. Posteriormente, o teor de DQO decaiu (Figura 5.17). Comparado com a evaporação a pressão normal, o maior valor de DQO de condensado para diferentes valores de pH aumentou de 300 para 700 mg /L.

Houve também um ponto de viragem com a diminuição da condensação de DQO no processo de evaporação a vácuo, como mostrado Na Figura 5.17 O valor de DQO foi menor do que 300 mg /L, quando a taxa de evaporação era maior do que 35%.

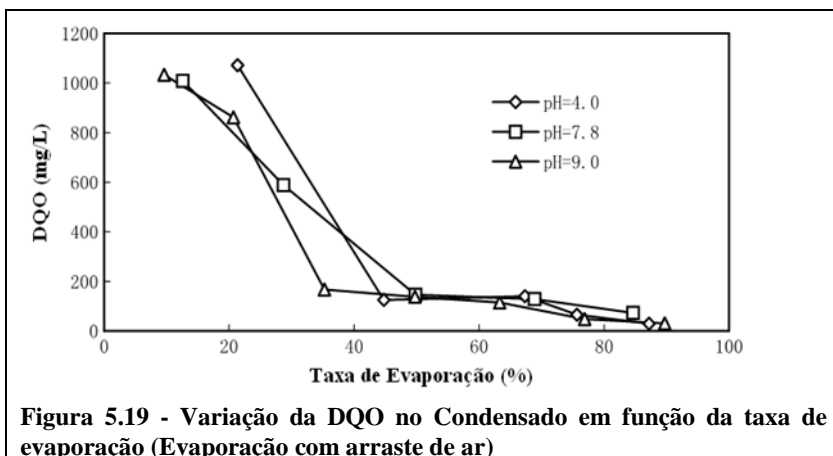


Na Figura 5.18 observa-se que a DQO aumentou ligeiramente após a taxa de evaporação estar em 35%, e o pico foi com uma taxa de evaporação igual a 14%.



Problemas operacionais foram detectados durante as evaporações em condições básicas, pH igual 9,0 como formação de espuma.

Nas evaporações por arraste de ar a variação das concentrações de DQO no condensado são apresentadas na Figura 5.19. Da mesma forma, os COV fizeram-se presentes no início da evaporação, quando havia pouco volume de condensado.



Houve também um ponto de viragem com a diminuição da DQO no condensado. O valor de DQO foi menor do que 300 mg / l, quando a taxa de evaporação era maior que 40%. A DQO foi aumentando gradualmente até a taxa de evaporação alcançar 85% (Figura 5.20).

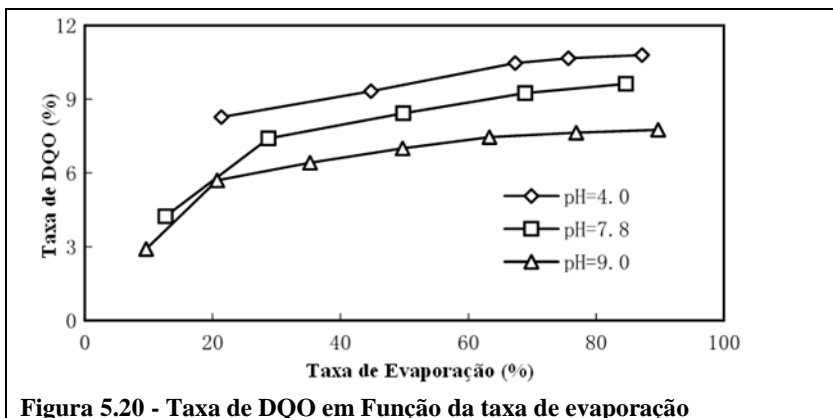


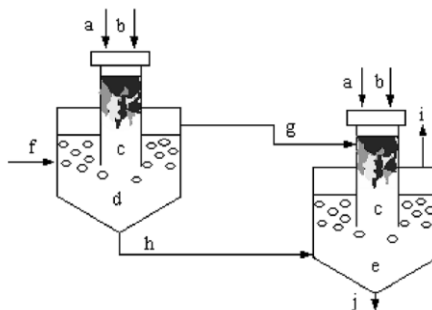
Figura 5.20 - Taxa de DQO em Função da taxa de evaporação

Os resultados experimentais demonstraram que os produtos da evaporação podem ser divididos em três partes:

- Condensado 1: que contém uma grande quantidade de compostos orgânicos voláteis, necessitando de um segundo tratamento como tratamento biológico por exemplo.
- Destilado 2 : pode ser descarregado diretamente no ambiente ou receber um tratamento simples
- Concentrado: rico em matéria orgânica e sais, podendo ser disposto no aterro sanitário novamente ou solidificado.

Um benefício da técnica de evaporação é a geração de apenas uma parte de resíduo que necessitam voltar ao aterro sanitário novamente (concentrado).

Os resultados das evaporações descritas acima foram utilizados para desenvolver um sistema de evaporação por combustão submersa em dois estágios (Figura 5.21) para operar no aterro de Pequim.



- a) Biogás,
- b) Ar para Combustão
- c) Câmara de Combustão
- d) Evaporador Combustão submersa 1º estágio
- e) Evaporador Combustão submersa 2º estágio
- f) Alimentação de lixiviado do aterro sanitário
- g) Vapor
- h) Primeiro Concentrado
- i) Condensado
- j) Concentrado Final

Figura 5.21 - Diagrama esquemático do processo por evaporação submersa em dois estágios.

Os dados de caracterização do efluente da entrada e saída do evaporador submerso com duas fases são apresentados na Tabela 5.19 a seguir:

Tabela 5.19 - Dados operacionais do evaporador submerso em duas

Parâmetro	Unidade	Afluente	Condensado
COD	mg / l	11000-13200	65-135
TDS	g / l	37-42	0.02-0.56

A maioria dos compostos orgânicos voláteis foram evaporados pelo evaporador na primeira fase e, em seguida, enviado para a câmara de combustão na segunda fase. O evaporador na segunda etapa tinha a função de evaporar o lixiviado, concentrando-o e gerando mais calor para possibilitar a queima dos compostos orgânicos restantes.

O vapor produzido na segunda fase ainda continha alguns compostos orgânicos. O sistema de evaporação por combustão submersa foi adaptado para trabalhar juntamente com processos de biorreatores de membranas e osmose reversa.

No processo combinado a maioria da amônia e matéria orgânica era retirada pelo biorreator de membrana, com uma taxa de remoção de DQO em torno de 40-55%. O concentrado dos processos de osmose reversa e do biorreator de membrana alimentavam o evaporador por combustão submersa possuíam uma DQO de 13200mg/L.

O evaporador por combustão submersa apresentava uma capacidade de 20m³/d. para tratar 1 m³ de concentrado das etapas anteriores o evaporador utilizava 150 m³ de biogás com 60% de metano.

O sistema de evaporação submersa produziu um condensado que podia ser descartado diretamente no meio ambiente sem a necessidade de um tratamento prévio.

5.8. Evaporação e coogeração de Energia, Hercule et al., 2005

Hercule et al desenvolveram um sistema de evaporação com uma unidade de coogeração de energia a partir do biogás gerado no aterro sanitário.

Foram realizadas duas etapas de evaporação em condições de vácuo seguida de um pós-tratamento.

O aterro sanitário, que iniciou suas atividades no ano de 1996, recebia 680 toneladas de resíduos sólidos por dia com uma composição média de 40% de resíduos domésticos e 35% de resíduos comerciais e industriais. A área do aterro era de 20 há.

Os lixiviado eram coletados através um canal de drenagem, por gravidade onde eram bombeados para dois tanques com capacidade de 3000 m³.

Na Tabela 5.20 pode-se observar a caracterização do lixiviado Bruto

Tabela 5.20 - Composição do lixiviado bruto

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Média	Desv Padrão.	Número de amostras
pH	7,50	8,40	8,02	0,17	97
Sólidos em suspensão (mg / l)	11	493	101	63	262
DQO (mg DQO / l O ₂)	271	3600	878	409	262
DBO (mg DBO/ l O ₂)	30	2562	310	285	262
DBO / DQO	3%	74%	34%	20%	262
COT (mg / l)	23	1310	303	171	241
DQO / COT	0,95	54,21	3,24	3,40	241
NH ₄ ⁺ (mgN / l)	5	567	164	133	261
Total de metais pesados (mg / l)	0,05	4,00	0,53	0,80	250

Acredita-se que a razão DQO/DBO teve seus picos amortecidos devido à mistura do lixiviado proveniente de células antigas e de células novas. No entanto observa-se que no início da operação do aterro sanitário, em 1997, o lixiviado como já era de se esperar apresentava uma biodegradabilidade alta, DBO/DQO no ano de 1997 era igual a 90%. Em contrapartida no ano de 2009 a razão DBO/DQO era de 15% comprovando que a biodegradabilidade do lixiviado decai conforme o envelhecimento do lixiviado no aterro sanitário (Figura 5.22).

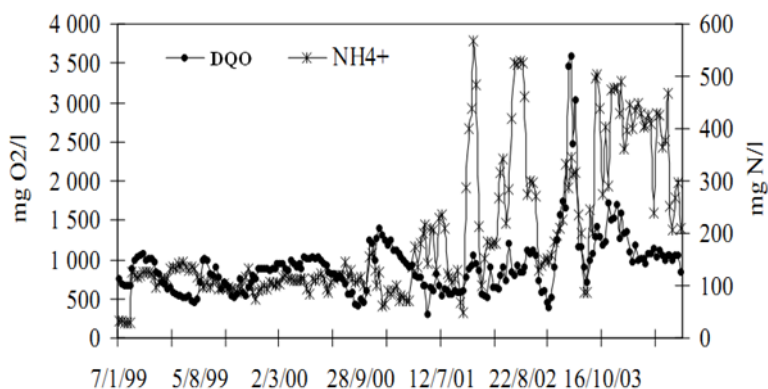


Figura 5.22 - Concentração de amônia e DQO em lixiviado bruto

Estudos para definir a faixa de variação dos parâmetros de maior importância, listados na Tabela 5.21, foram levantados para nortear a eficiência necessária para o tratamento.

Os limites Máximo de lançamento de poluentes de acordo com a classificação dos rios, neste caso de estudo, a classificação para rios Franceses, foi 1B e os seus limites máximos de lançamento também podem ser observados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Características e limites de lançamentos de efluentes em rios Franceses (1B)

Parâmetros	Unidade	Entrada	Saída
pH		6-9	6,5 - 8,5
Sólidos em suspensão	mg / l	600	30
(DQO)	mg / l O ₂	2800	25
DBO	mg / l O ₂	700	5
Cloreto	mg / l	5000	200
O nitrogênio total	mg N / l	800	2
NH ₄ ⁺	mg N / l	800	0,5
Fenóis	mg / l	50	0
AOX	mg / l	10,00	0,10

A DQO média para um período de oito anos e 297 amostras de acordo com a Tabela 5.20 foi igual a 878 mg/L e a concentração da amônia foi aumentando no decorrer dos anos de funcionamento do aterro, ambos os parâmetros estão em desacordo com os padrões de lançamento de efluentes Franceses.

5.8.1. Metodologia utilizadas nos trabalhos desenvolvidos por Hercule et al., 2005

A escolha da tecnologia de evaporação levou em consideração as características do lixiviados e os padrões de lançamento dos mesmos.

Estima-se que por anos seja gerado cerca de 10.000m³ de lixiviados e a taxa de alimentação de lixiviados para o sistema de tratamento é de 30m³/d. O biogás do aterro foi utilizado para evaporar o lixiviado, através da criação de uma central energética. A descrição e explicação das etapas do tratamento são apresentadas e descritas a seguir:

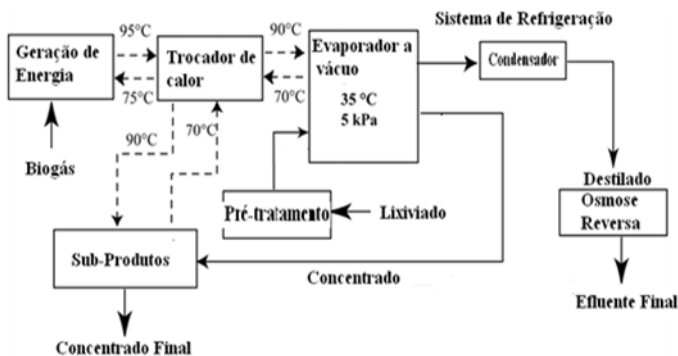


Figura 5.23 - Esquema do Tratamento Adotado

- Pré-tratamento

O pré-tratamento de lixiviados consiste basicamente no ajuste de pH para impedir a mudança de fase amônia (fase líquida para fase

gasosa). O chorume foi acidificado com ácido clorídrico até o pH ficar igual a 5.

Após o ajuste de pH o efluente sofreu um stripping de gases para eliminar os gases que não sofreriam condensação. Os gases retirados eram tratados em uma coluna com carvão ativado.

Um dos problemas ocorridos nesta etapa foi à formação de espuma no concentrado antes de completar a evaporação.

- Estágio de Evaporação

O efluente é sugado para dentro da câmara de ebulição sob vácuo, a uma pressão de 5-6 kPa. A condensação de vapor é realizada por um refrigerador de ar acoplado ao evaporador. O destilado é recolhido em um tanque de armazenamento equipado com uma serpentina de resfriamento. A pressão residual é mantida na evaporação por uma bomba, que utiliza ar ambiente como fluido motor. O arrefecimento do destilado melhora a eficiência do sistema de vácuo.

Esta tecnologia é baseada na circulação forçada a aumentar o fator de concentração. O lixiviado é, portanto, recirculado na câmara de ebulição. O concentrado é descarregado sequencialmente através da abertura de uma válvula pneumática. O tempo de intervalo é definido por testes de laboratório e verificado durante o período de testes.

- Pós Tratamento

Devido aos requisitos de descarga de efluente, Tabela 5.21, serem bem rígidos para adequar o efluente aos padrões de lançamento foi escolhida uma tecnologia para fazer um segundo tratamento no lixiviado condensado. Neste caso a tecnologia escolhida foi à osmose reversa com colunas de troca iônica com carvão ativado.

- Osmose Reversa

O destilado foi bombeado para um estágio de osmose reversa dupla (RO). A capacidade de tratamento era de 1,5m³/h de permeado. O concentrado de osmose reversa era coletado em um tanque de armazenamento de chorume. Este tratamento permitiu a remoção de amônia e compostos orgânicos.

- Adsorção de carvão ativado

O permeado da osmose reversa era recolhido em um tanque onde tinha seu pH corrigido com a adição de hidróxido de sódio e hipoclorito. O NaOH alcalino permitia a correção do PH antes da descarga do

efluente no meio ambiente e o hipoclorito de sódio foi usado para esterilizar as colunas e evitar a fixação de microrganismos e conseqüentemente obstrução dos grãos de carvão ativado devido ao crescimento biológico além de atuar como oxidante para DQO e amônia que ainda ou pudessem se fazer presentes.

No tratamento faziam-se disponíveis duas colunas de carvão ativado, um era reserva para o caso de eventuais problemas, ou era utilizada durante as operações de limpeza da coluna que se encontrava em uso. Após a sua saturação o carvão ativado era encaminhado para regeneração.

- Troca iônica

Finalmente, o efluente tratado circulava por resinas de troca catiônica, a fim de obter uma remoção final de amônia.

- Segundo estágio de evaporação

A segunda etapa de evaporação a vácuo tinha o objetivo de diminuir o teor de água do concentrado da primeira fase de evaporação, produção de um super concentrado. Um raspador de lodo raspava o lodo que se depositava nas laterais do evaporador conforme Figura 5.24.

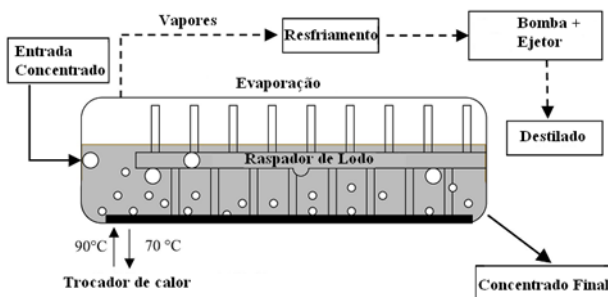


Figura 5.24 - Esquema do evaporador utilizado no segundo estágio

A parte inferior da câmara de evaporação possuía um trocador de calor, onde o calor era fornecido ao sistema era proveniente da primeira etapa de evaporação, proveniente do sistema de resfriamento.

A temperatura de evaporação oscilava entre 35 e 45 °C e a pressão estavam na faixa de 5-6 kPa. O destilado era coletado e tratado na etapa de pós-tratamento. Uma bomba garantia o vácuo na câmara.

O ciclo de evaporação era controlado pelo nível de lixiviado na câmara de evaporação. O processo de transferência de calor era medido assim como a vazão com o objetivo de avaliar a eficiência global do sistema através de um balanço de massa.

- Energia requerida pelo sistema

A energia térmica teórica necessária para aquecer lixiviados de 5 ° C a 45 ° C adicionado ao calor latente de evaporação demandou 870 kW em termos de energia elétrica. A energia térmica necessária para a realização da primeira evaporação, com temperaturas a entre 30 ° C a 45 ° C foi cerca de 80 kW.

Em ambos os estágios essa energia foi fornecida a partir do biogás gerado no aterro sanitário.

- Desempenho do sistema

O sistema foi avaliado em laboratório, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os resultados das análises realizadas.

Tabela 5.22 - Análise das evaporações

Parâmetros	Lixiviado Bruto	1º Etapa	2º Etapa	
		Destilado	Destilado	Concentrado
pH	7,5	6,2	6,7	4
Sólidos 105 ° C (%)	0,384			35
Perda de ignição (%)	0,273			17,7
Condutividade (mS / cm)	6900	50	105	
COD (mg / l)	1020	26,3	36,8	
Cloreto (mg / l)	594,9			
Amônio (mg / l)	220	14,4	89,4	
NTK (mg / l)	363	19,1	119	
Fenóis (mg / l)	18,7	<0,01	<0,01	

O lodo (concentrado) gerado no sistema chega a 35% no segundo estágio de evaporação com um teor de sólidos igual a 0,3%

A concentração de DQO apresentou-se baixa nos destilados e os compostos voláteis e semi voláteis devido ao ajuste de pH se mantiveram no concentrado.

Em condições alcalinas a amônia é impedida de passar para a fase gasosa.

- Balanço de massa:

O balanço de massa global, a partir de exames laboratoriais, incluindo o pós-tratamento, foi:

Entrada: 30 toneladas de lixiviado por dia, geração de resíduos na osmose reversa foi igual a 1,6 toneladas por dia nos sistemas de evaporação.

Saída: Permeado da osmose reversa: 29,7 t/dia com 0,33 t/d de concentrado e 31,2 t/d de destilado.

5.8.2. Considerações Finais apontadas por Hercule et al., 2005

A associação de circulação forçada com evaporação forçada de lixiviados com o uso de evaporadores a vácuo aumenta o fator de concentração e reduz os custos relacionados ao tratamento concentrado final. Os custos de capital foram 958.000 € (euros), sem obras de construção civil. Os custos operacionais, incluindo o consumo de eletricidade, bem como os reagentes acarretou e, um tratamento com gastos de 10 € / m³ do lixiviado tratado.

5.9. Monitoramento de parâmetros ambientais na evaporação de Chorume, Vignoli e Aguiar (2007)

Os autores monitoraram os parâmetros ambientais do processo de evaporação de chorume e avaliaram os impactos ambientais das emissões atmosféricas provenientes de um aterro sanitário na baixada fluminense (RJ).

Amostras de lixiviados foram coletadas durante o período de Nov/06 a abr/07 e os seguintes parâmetros foram analisados:

- pH e condutividade (amostras de chorume bruto)
- nitrogênio amoniacal (N-NH₃) e DQO (amostras de chorume acidificado com ácido sulfúrico concentrado a pH = 2)

Em um balão de destilação, adaptado e imerso em um banho de silicone, com capacidade volumétrica igual a 1 litro foram transferidas alíquotas de 500 mL de lixiviado para posterior aquecimento da mesma em temperaturas em torno de 103 °C e com vazões de lixiviado condensado na ordem de 5 mL/min.

O aterro sanitário teve sua implantação no ano de 2003, e como as análises foram realizadas entre os anos de 2006 e 2007 o lixiviado ainda era jovem e encontrava-se na fase metanogênica, como pode ser comprovado nos resultados experimentais obtidos por Vignoli e Aguiar (2007) na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 - Caracterização do chorume acidificado a pH 2, com H₂SO₄ concentrado.

Parâmetros	Valores
------------	---------

pH	7,6 a 8,0
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$ a 25°C)	16300 a 22600
DQO (mg/L O_2)	2000 a 4000 (Acidificado)
N-NH ₃ (mg/L)	900 a 1300 (Acidificado)

O tratamento por evaporação consistia basicamente em evaporar o lixiviado e o concentrado resultante do processo de evaporação voltava para o aterro sanitário.

Nos experimentos realizados por Vignoli e Aguiar (2007) o lixiviado bruto in natura foi destilado a pressão ambiente. Quatro alíquotas de 100 mL cada (A, B, C, D) do condensado foram recolhidas à temperatura ambiente, para a realização posterior das análises de pH, condutividade, DQO e N-NH₃. As médias dos parâmetros ambientais obtidos, após quatro evaporações distintas do chorume, encontram-se na Tabela 5.24

Tabela 5.24 - Caracterização do condensado, após evaporação do chorume, à pressão ambiente

PARÂMETROS	A	B	C	D
pH	9,0	8,5 a 7,6	6,8 a 6,3	4,7 a 4,6
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$ a 25°C)	2690 a 2300	163 a 120,2	106,3 a 73,7	76 a 68
DQO (mg/L O_2)	1480	-	-	79
N-NH ₃ (mg/L)	3951,41 a 3189,31	-	-	-

Onde: A, B, C e D: alíquotas a cada 100 mL destilados do lixiviado bruto (sem acidificação)

De acordo com as análises dos resultados a primeira alíquota (A) apresentou elevado pH e alta carga orgânica. Com o passar do tempo, o pH do condensado foi tornando-se ácido. Essa alteração ocorreu em

virtude das elevadas concentrações de amônia que emanavam para a atmosfera decorrentes do processo de evaporação.

Nesse âmbito os autores avaliaram também a influencia da acidificação na qualidade da evaporação em termos de diminuição das emissões atmosféricas de amônia.

Duas amostras de chorume foram acidificadas com ácido sulfúrico concentrado a pH 2 e evaporadas à pressão e temperatura ambiente e determinou-se a concentração de N-NH₃ amoniacal no evaporado. Os valores obtidos estão indicados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 - Chorume acidificado com ácido sulfúrico a pH 2 e evaporado

PARÂMETRO	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
N-NH ₃ (mg/L)	0,38	3,02

Comparando os resultados da Tabela 5.24 com os obtidos na Tabela 5.25 verifica-se uma redução de 99,9 % nos teores de amônia encontrados no evaporado.

Após comprovar a eficiência da acidificação sobre os teores de amônia os autores avaliaram a influencia de diferentes tipos de ácidos e do pH no meio durante os ensaios de evaporação.

Foram realizados novos experimentos, onde amostras de chorume acidificadas com H₂SO₄ (ácido sulfúrico), HNO₃(ácido nítrico) e HCl (ácido clorídrico), em diferentes pH (2, 4 e 6), foram evaporadas. Frações condensadas de aproximadamente 100 mL foram recolhidas e analisadas para N-NH₃ amoniacal, a fim de avaliar qual o ácido e pH promoveu a retenção mais significativa de amônia no resíduo, como pode ser observado na Tabela 5.26.

Tabela 5.26 - Variação da natureza do ácido no pré-tratamento do lixiviado

NATUREZA DO ÁCIDO	N-NH ₃ (mg/L)		
	pH 2	pH 4	pH 6

H ₂ SO ₄	3,96	26,85	174,69
HNO ₃	6,62	17,98	46,61
HCl	10,36	18,20	166,56

Tornou-se notável a relação existente entre a eficiência na retenção da amônia e o pH do lixiviado. Para pH menores a quantidade de amônia foi menor do que para pH maiores. Em relação ao ácido utilizado o que apresentou melhor desempenho foi o ácido sulfúrico na faixa de pH 2, uma maior quantidade de amônia foi retida com o uso de ácido sulfúrico concentrado

5.9.1. Conclusões obtidas ao final do trabalho de Vignoli e Aguiar (2007)

Ao final do seu trabalho os autores puderam concluir que a utilização de um pré-tratamento do chorume, antes de sua evaporação, com ácido sulfúrico concentrado, a pH 2, minimizou as emissões de amônia atmosférica.

O processo de evaporação do chorume, isoladamente, não pode ser considerado como uma forma plena de tratamento de chorume, pois se cuidados não forem tomados haverá somente uma transferência de poluição da fase líquida para a fase gasosa.

5.10. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários utilizando um evaporador unitário, Bacelar et al, 2008.

Bacelar et al, 2008 avaliaram a aplicação da evaporação, utilizando um equipamento denominado Evaporador Unitário (EU),

como técnica de tratamento do lixiviado proveniente do aterro de Gramacho localizado no Rio de Janeiro e operado pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB).

O evaporador unitário era alimentado com biogás, que conduzido para o interior do equipamento sofria queima e liberava energia na forma de calor para evaporar o lixiviado.

A sua instalação dava-se próximo a um poço de biogás, e também se encontrava próximo a um tanque de armazenamento de lixiviado.



Figura 5.25 - Evaporador Unitário localizado no aterro de Gramacho

O monitoramento do Evaporador Unitário era realizado diariamente e os parâmetros de controle operacional eram: horário de abastecimento de lixiviado, volume de abastecimento, volume evaporado (através de leituras do hidrômetro), temperatura ambiente e índice pluviométrico. Através desses dados tornava-se possível avaliar o rendimento da evaporação apresentado pelo equipamento, em litros por hora, assim como possíveis interferências das condições climáticas locais neste rendimento.

O rendimento médio do EU registrado foi de 27,8 litros de lixiviado evaporado por hora de operação do equipamento. Os períodos de avaliação compreenderam Agosto/2007 a Outubro/2007 e

Fevereiro/2008 a Março/2008. Os resultados obtidos são apresentados resumidamente na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 - Desempenho do Evaporador Unitário

Mês/Ano	Temperatura Média (°C)	Índice Pluviométrico (mm/mês)	Volume Evaporado Total (L)	Tempo Total Evaporação (h)	Rendimento Médio (L/h)
Agosto/2007	22	51	7.560	258,7	29,2
Setembro/2007	22	86	13.840	505,5	27,4
Outubro/2007	23	89	13.490	493,7	27,3
Fevereiro/2008	27	152	2.270	76,9	29,5
Março/2008	26	189	4.220	154,4	27,3

Os resíduos gerados no evaporador unitários eram: (a) Resíduo 1, com aspecto viscoso e resultante do lixiviado não evaporado, (b) Resíduo 2, resíduo sólido acumulado durante o processo de evaporação e removido na limpeza periódica do equipamento; e (c) Resíduo líquido obtido na condensação dos gases gerados pelo EU.(ver Figura 5.25).

As Tabela 5.28,Tabela 5.29 e Tabela 5.30, apresentam a caracterização dos resíduos citados acima.

Tabela 5.28 - Estatísticas descritivas das análises do Lixiviado Bruto

Lixiviado	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	NH4 (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Cor PtCo	Turbidez FAU
Média	2678	244	4084	7145	573	152	8,0	7148	412
Minimo	1770	0	2595	3500	91	33	7,5	30,60	165
Maximo	3925	591	5723	12300	1942	500	8,7	21250	1095

Tabela 5.29 - Estatísticas descritivas das análises do Resíduo 1

Lixiviado	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	NH4 (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Cor Pt co	Turbidez FAU
Média	42536	nd	81839	44864	341	7607	9,2	296055	10365
Minimo	16500	nd	45633	7000	62	946	8,9	19200	1500
Maximo	73000	nd	138047	80000	1161	18080	9,5	1410000	28500

Tabela 5.30 - Estatísticas descritivas das análises do Vapor Condensado

Lixiviado	DQO (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	NH4 (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Cor Pt co	Turbidez FAU
Média	259	207	1287	760	25	8,74	69	15
Minimo	34	5	52	12	1	7,01	24	1
Maximo	862	1254	6300	4489	99	10	103	31

Para comparar os valores obtidos em campo e monitorar os teores de amônia os autores realizaram testes de evaporação em bancada que consistiam em evaporar o lixiviado utilizando uma manta elétrica, sob temperatura constante (entre 99°C e 101°C), e condensar os vapores gerados com auxílio de um condensador de vidro, conforme ilustrado na Figura 5.26. Para garantir a preservação da amônia na amostra de vapor condensado, optou-se pelo resfriamento do frasco de coleta do condensado.

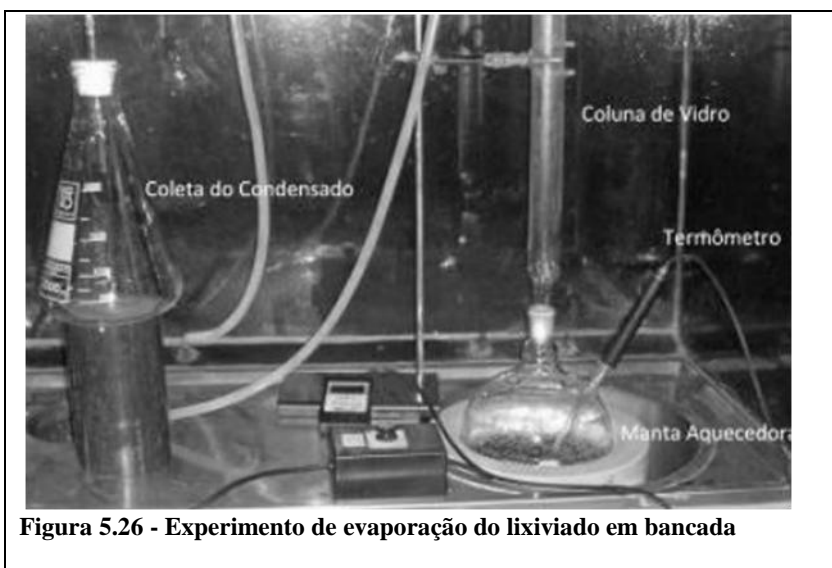


Figura 5.26 - Experimento de evaporação do lixiviado em bancada

Tabela 5.31 - Estatísticas descritivas das análises do Lixiviado Bruto no experimento em bancada

Lixiviado	DQO (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	NH4 (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Cor Pt co	Turbidez FAU
Média	2168	3456	5567	1869	49	7,5	5123	2665
Mínimo	1800	2595	5300	755	29	7,3	3144	178
Maximo	3035	4141	6200	2741	77	7,6	7350	12000

Tabela 5.32 - Estatísticas descritivas das análises do Resíduo Concentrado no experimento em bancada

Lixiviado	DQO (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	NH4 (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Cor Pt co	Turbidez FAU
Média	11284	31052	4867	119	1415	8,7	23340	1992
Mínimo	2205	6426	3200	0,42	432	7,4	9600	785
Maximo	38000	144471	6000	688	3850	9,6	47000	2876

Tabela 5.33 - Estatísticas descritivas das análises do Vapor Condensado no experimento em bancada

Lixiviado	DQO (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	NH4 (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Cor Pt co	Turbidez FAU
Média	31	255	4157	826	25	8,4	25	14
Mínimo	13	96	680	21	432	7,7	10	1

Ao final do seu trabalho Bacelar et al, 2008 concluíram que:

Durante o período de operação considerado, o rendimento médio do Evaporador Unitário foi de 27,8 L/h, sem sofrer grande variação entre os resultados mensais obtidos apresentando-se como uma opção tecnológica eficiente, de baixo custo e de fácil operação para o tratamento de lixiviados, adequando-se principalmente a aterros de pequenos e médios portes.

Pode-se observar que o Lixiviado Bruto apresentou grande variabilidade em relação aos parâmetros físico-químicos, apresentando uma relação DBO/DQO muito baixa (em torno de 0,12), confirmando a hipótese de alta recalcitrância do lixiviado e, portanto, da sua difícil degradação biológica.

Para os resíduos coletados no EU (experimentos de campo), deve-se destacar as seguintes observações:

- o Resíduo 1 apresentou elevada concentração de matéria orgânica, amônia, sólidos e cloretos. Seu pH foi básico (9,2);
- o Vapor Condensado foi básico, com baixa concentração de DQO e cloretos. Concluindo que as condições ambientais impediram a fixação da amônia na amostra coletada

Nos testes de evaporação em bancada pode-se destacar a elevação do pH nas amostras de Resíduo e de Condensado, compatível com os resultados obtidos para as mesmas amostras em campo. De maneira similar, destacou-se o acúmulo de sólidos e de matéria orgânica no Resíduo concentrado. As condições de laboratório permitiram a detecção da amônia no Vapor Condensado, uma vez que cuidados experimentais foram tomados para impedir sua volatilização.

5.11.Avaliação da qualidade do efluente resultante da evaporação/destilação, Haddad, 2009

Em suas pesquisas realizadas durante o ano de 2009, Haddad com o objetivo de avaliar a qualidade do efluente resultante da evaporação/destilação do lixiviado do Aterro Sanitário Canhanduba, Itajaí/SC realizou 21 ensaios de evaporação em escala de bancada.

5.11.1. Metodologia utilizada durante a realização dos trabalhos desenvolvidos por Haddad , 2009

Todos os experimentos foram realizados dentro de uma capela de exaustão devido a possíveis gases que podiam ser liberados durante o processo de evaporação. O experimento consistiu em evaporar/destilar o lixiviado no interior de um balão de destilação. O líquido, aquecido e evaporado, fluiu pela coluna de destilação passando por um condensador, onde o vapor condensado foi coletado e armazenado para ser analisado posteriormente.

O concentrado resultante do processo de evaporação/destilação foi igualmente armazenado para posterior análise. A coleta das amostras de lixiviado bruto foi realizada semanalmente, sendo que três ensaios foram realizados para cada coleta.

Os seguintes parâmetros foram analisados: pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Amoniacal (N-NH₃), Cloretos (Cl⁻), Condutividade, Alcalinidade (CaCO₃), Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos Totais (SFT) Sólidos Voláteis Totais (SVT), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Sólidos Suspensos Totais (SST).

A Figura 5.27 mostra o aparato experimental utilizado por Haddad, baseado no mesmo aparato utilizado por Aguiar e Vignoli (2007) e Yue et al. (2007), já citados anteriormente neste trabalho.

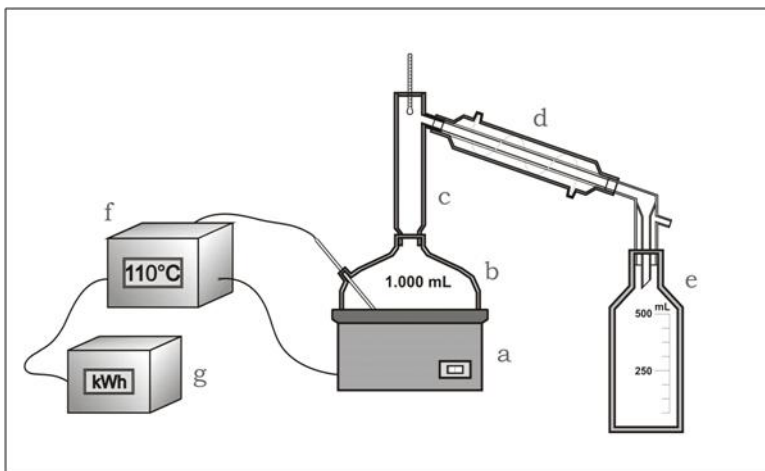


Figura 5.27 - Representação esquemática do aparato experimental:

(a) manta aquecedora; (b) balão de destilação; (c) coluna de destilação; (d) condensador; (e) frasco armazenador do efluente condensado; (f) controlador de temperatura; e (g) medidor de consumo de energia.

O funcionamento do experimento consistia basicamente em colocar o balão de destilação no interior de uma manta aquecedora que fornecia energia ao sistema e evaporava o lixiviado.

O volume inicial da amostra que foi evaporada/destilada foi de 1.000 mL para todos os 21 ensaios.

A primeira etapa consistiu na evaporação/destilação de 500 mL da amostra inicial. O objetivo desta etapa foi avaliar a qualidade do efluente concentrado e condensado resultante do experimento de evaporação. Para isso, foram realizados 9 ensaios, sendo três ensaios a cada temperatura de ajuste (102, 110 e 120 °C). As temperaturas de ajuste foram escolhidas para verificar uma possível variação na concentração dos parâmetros analisados para o efluente resultante, causado pela diferença de energia fornecida ao sistema em forma de calor.

Um balanço de massa foi construído para quantificar as perdas durante o processo de evaporação/destilação dos parâmetros analisados.

O fluxo de água de resfriamento no condensador foi mantido em 500 mL.min⁻¹ para todos os ensaios. E a temperatura da massa líquida foi controlado com a instalação de um termômetro localizado na mesma.

Na realização do balanço de massa o autor procurou comparar as concentrações do efluente resultante do processo, concentrado e condensado, com a concentração do lixiviado bruto. Esta comparação foi realizada através da soma das frações de massa (em porcentagem) do concentrado e condensado.

Na segunda etapa procedeu-se a avaliação da evolução da qualidade do efluente condensado e concentrado referente ao processo de evaporação/destilação, com a retirada de alíquotas do condensado durante o processo de evaporação/destilação. Durante esta etapa o volume total evaporado foi de até 950 mL da amostra inicial. Para isto, 12 ensaios de evaporação/destilação foram efetivamente realizados, 9 destes com lixiviado in natura e 3 ensaios com ajuste prévio de pH do lixiviado bruto.

Ao contrário da primeira etapa, onde foi fixado o volume de 500 mL a ser evaporado/destilado para todos os ensaios, a segunda etapa evaporou/destilou 500 mL nos 3 primeiros ensaios, 750 mL para os 3 ensaios posteriores e 950 mL para os últimos 6 ensaios. O fluxo de água de resfriamento no condensador foi mantido em 500 mL.min⁻¹ para todos os ensaios. A temperatura de ajuste foi de 110 °C para todos os ensaios.

Para os 3 primeiros ensaios, foram retiradas alíquotas do condensado durante o processo nos volumes fixos equivalentes à evaporação/destilação de 100, 250 e 500 mL. Um volume final de 500 mL, portanto, remanesceu como concentrado.

Para os 3 ensaios seguintes, foram retiradas alíquotas durante a evaporação/destilação nos volumes fixos equivalentes à evaporação/destilação de 100, 250, 500 e 750 mL. Um volume de 250 mL, conseqüentemente, remanesceu como concentrado.

Para os últimos 6 ensaios, foram retiradas alíquotas do condensado durante o processo nos volumes fixos equivalentes à evaporação/destilação de 100, 250, 500, 750 e 950 mL. Remanesceu, portanto, um volume de concentrado igual a 50 mL. Para os 3 últimos ensaios do total de 6, a evaporação/destilação foi realizada com acidificação prévia do lixiviado bruto, utilizando o H₂SO₄ PA até atingir um pH próximo de 4.

Os parâmetros monitorados nesta segunda etapa foram:

- Para o condensado: DQO, N-NH₃ e Cl⁻.
- Para o concentrado remanescente: DQO, N-NH₃, Cl⁻, ST, SFT e SVT.

5.11.2. Resultados e Discussões

A caracterização do lixiviado bruto (tabela h) indicou uma dificuldade em caracterizar o lixiviado uma vez que o lixiviado em questão é proveniente da mistura de lixiviados formados em um aterro com duas células, uma nova e uma velha. No entanto o pH entre 7,8 e 8,1 indicou um lixiviado em fase de estabilização, indicando o início da fase metanogênica. As análises de COT indicaram que o mesmo contribui com metade da DQO e a amônia N-NH_3 , mensurada no lixiviado bruto apresentou-se elevada, sendo os valores superiores a $1.800 \text{ mgN-NH}_3\text{.L}^{-1}$.

Tabela 5.34 - Caracterização do lixiviado bruto durante o período experimental

Parâmetro	Unidade	Média	Mínimo	Máximo	σ	n
pH	-	7,9	7,8	8,1	0,1	7
DQO	mg.L ⁻¹	3.690	1.652	6.725	1.648	7
COT	mg.L ⁻¹	1.485	813	2.999	834	6
N-NH ₃	mg.L ⁻¹	2.146	1.848	2.733	315	7
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	4.033	2.000	6.430	2.695	7
Condutividade	μS.cm ⁻¹	15.538	14.397	17.450	1.010	7
Alcalinidade	mg.L ⁻¹	10.717	9.120	12.700	1.373	7
ST	mg.L ⁻¹	10.943	8.684	13.001	1.859	7
SFT	mg.L ⁻¹	8.882	6.939	10.881	1.629	7
SVT	mg.L ⁻¹	2.061	1.616	2.743	340	7
SDT	mg.L ⁻¹	9.876	7.690	12.371	2.272	4
SST	mg.L ⁻¹	855	450	1.180	376	4

σ – desvio padrão; n – número de amostras; alcalinidade como CaCO₃

Com relação aos testes de evaporação de modo geral a evolução do volume evaporado/destilado em função do tempo indicou que a taxa de evaporação aumentou proporcionalmente com o aumento da energia fornecida ao sistema em forma de calor (temperatura de ajuste).

Em uma temperatura de 102 °C o tempo necessário para evaporar/destilar 500 mL de lixiviado superou 220 min.

No entanto nos ensaios onde a temperatura de ajuste foi de 110 e 120 °C, o tempo necessário para evaporar/destilar 500 mL foi próximo a 110 e 100 min. respectivamente.

A Tabela 5.35 mostra a concentração média dos parâmetros analisados para o concentrado e condensado resultantes do processo de evaporação/destilação.

Tabela 5.35 - Comparação dos resultados obtidos para as diferentes temperaturas

	Unidade	Concentrado						Condensado					
		102 °C		110 °C		120 °C		102 °C		110 °C		120 °C	
		Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ
n	-	3	-	3	-	3	-	3	-	3	-	3	-
pH	-	10,3	0,2	9,9	0,2	9,7	1	9,1	0,1	9,2	0,1	9,1	0,1
DQO	mg L ⁻¹	6.669	2.414	6.143	1.646	6.997	1.018	145	65	117	46	131	54
COT	mg L ⁻¹	2.285	449	2.454	448	2.546	352	-	-	149 [▲]	134 [▲]	192 [▲]	74 [▲]
N-NH ₃	mg L ⁻¹	9	5	11	2	10	3	4.097	1.152	4.051	32	4.228	219
Cl ⁻	mg L ⁻¹	6.800	2.778	5.600	3.928	6.500	1.323	107	6	221	81	127	24
Condutividade	µS.cm ⁻¹	14.893	495	14.537	918	14.923	150	15.457	494	15.467	604	15.183	299
Alcalinidade (CaCO ₃)	mg L ⁻¹	4.567	757	4.317	1.107	5.073	1.399	15.127	575	14.893	1.228	15.053	350
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	20.439	2.904	20.664	3.391	21.900	4.396	110	95	31	12	123	34
Sólidos Fixos Totais	mg L ⁻¹	17.485	2.651	17.417	3.293	17.699	3.533	75	104	11 [▲]	13 [▲]	14	17
Sólidos Voláteis Totais	mg L ⁻¹	2.954	707	3.240	130	4.201	1.312	36	16	24	9	109	39
Sólidos Dissolvidos	mg L ⁻¹	18.352	2.911	18.674	2.665	20.410	3.895	94	93	15	9	100	40
Sólidos Suspensos	mg L ⁻¹	2.087	273	1.983	717	1.490	503	25 [▲]	7 [▲]	17	12	23	23

σ - desvio padrão

n - número de amostras

[▲] - 2 amostras

De acordo com as variações dos parâmetros na Tabela 5.35 não se pôde correlacionar o aumento da energia fornecida ao sistema em forma de calor com maiores ou menores concentrações dos parâmetros analisados tanto para o concentrado como para o condensado. Isto se deve ao fato de que a variação de energia utilizada em forma de calor foi insignificante

Nas evaporações de primeira etapa (abela 5.36) houve aumento de pH em todos os ensaios. O autor justificou esse aumento reportando que foram devidos a volatilização dos ácidos orgânicos durante o processo de evaporação.

Os valores de condutividade, por outro lado, não sofreram grandes alterações após o processo de evaporação

A DQO e COT ficaram retidos no concentrado após a evaporação/destilação. Valores de 6.600 mgDQO.L-1 e 2.428 mgCOT.L-1 foram encontrados no concentrado, enquanto que apenas 131 mgDQO.L-1 e 171 mgCOT.L-1 foram carregados para o condensado. O valor ligeiramente superior de COT em relação à DQO no condensado pode ter ocorrido devido ao menor número de amostras realizadas para o COT.

A fração de massa para DQO no concentrado correspondeu a 90%; enquanto que no condensado a fração foi menor que 2%.

tabela 5.36 - Balanço de massa para o condensado e concentrado do lixiviado

	Bruto		Concentrado				Condensado				Σ FM §§§
	Média	n	Média	MT §	FM §§	n	Média	MT §	FM §§	n	
	mg.L ⁻¹	-	mg.L ⁻¹	mg	[%]	-	mg.L ⁻¹	mg	[%]	-	[%]
pH ^	7,9	7	10,0	-	-	9	9,1	-	-	9	-
DQO	3.690	7	6.603	3.302	89,5	9	131	65	1,8	9	91,2
COT	1.485	6	2.428	1.214	81,8	9	171	85	5,8	4	87,5
N-NH ₃	2.146	7	10	5	0,2	9	4.125	2.063	96,1	9	96,4
Cl ⁻	4.033	7	6.300	3.150	78,1	9	136	68	1,7	9	79,8
Condutividade ^^	15.538	7	14.784	-	-	9	15.369	-	-	9	-
Alcalinidade (CaCO ₃)	10.717	7	4.652	2.326	21,7	9	15.024	7.512	70,1	9	91,8
Sólidos Totais	10.943	7	21.001	10.500	96,0	9	88	44	0,4	9	96,4
Sólidos Fixos Totais	8.882	7	17.533	8.767	98,7	9	36	18	0,2	9	98,9
Sólidos Voláteis Totais	2.061	7	3.465	1.733	84,1	9	56	28	1,4	9	85,4
Sólidos Dissolvidos	9.876	4	19.145	9.573	96,9	9	69	35	0,4	9	97,3
Sólidos Suspensos	855	4	1.853	927	108,4	9	21	11	1,2	9	109,6

§ Massa Total [Produto da concentração média pelo volume da amostra (500 mL)]

§§ Fração de Massa [razão da Massa Total do parâmetro pela Massa do bruto]

§§§ Somatória das Frações de Massa do concentrado e condensado

^ adimensional

^^ μS.cm⁻¹

n - número de amostras

A amônia (N-NH_3) foi carregada em sua grande maioria para o condensado por ser uma substância volátil. Menos de 1 % permaneceu no concentrado e o autor estimou que 96 % da amônia foi evaporada.

Uma pequena parcela de cloretos foi carregada ao condensado, a fração de massa de cloretos no concentrado não atingiu 79 %, ou seja, esse desaparecimento de massa deveu-se na superfície interna do balão de destilação por parte das substâncias que compõem Cl^- junto aos sólidos durante o processo de evaporação; assim como a imprecisão do método analítico para amostras com elevadas concentrações.

Cerca de 96% dos sólidos permaneceram no concentrado e menos de 0,5% foram arrastados para o condensado o restante não pode ser computado. As principais causas explicadas pelo autor foram que uma parte dos sólidos composta por matéria volátil foi volatilizada devido à temperatura a que foi exposta, um aparte ficou aderida à superfície interna do balão de destilação; e a outra parte de sólidos podem ter sido decompostos ou solubilizados.

O condensado resultante do processo de evaporação/destilação apresentou-se límpido com uma excelente remoção de cor.

A alcalinidade (CaCO_3), assim como a N-NH_3 , foi carregada em grande parte para o condensado durante a evaporação/destilação. 70% do total presente no lixiviado bruto foram mensurados no condensado, enquanto que próximo a 21% foi retido no concentrado

A Figura 5.28 ilustra a variação da concentração de DQO no condensado ao longo do volume evaporado/destilado.

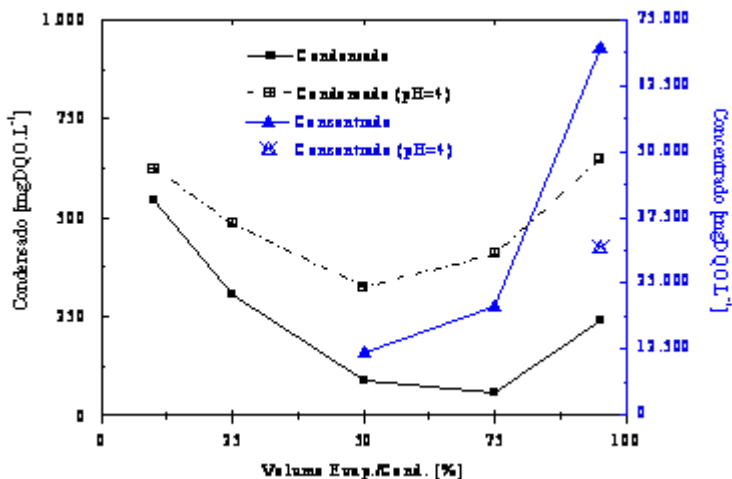


Figura 5.28 - Variação da DQO [mgDQO.L⁻¹] presente no liciviado condensado e concentrado em função do volume evaporado [%], com e sem acidificação prévia

Verificam-se duas etapas distintas na variação de DQO, uma é a evaporação/destilação do liciviado bruto in natura, enquanto que a outra se refere à evaporação/destilação dos liciviados brutos previamente acidificados com ácido sulfúrico a um pH igual a 4

Analisando o gráfico observa-se que a DQO apresentou valores iguais a 500 mgDQO.L⁻¹

E após isto teve um decaimento progressivamente na alíquota referente a 75 % do evaporado.

Isto ocorreu devido o rápido carreamento dos COV no início, a DQO apresentava valores altos no início. A estabilidade das substâncias húmicas presentes no liciviado, por outro lado, foi à principal razão desta queda. Após este ponto surgiu um ponto de viragem e a DQO voltou a subir.

O liciviado com acidificação previa teve o comportamento análogo ao liciviado evaporado in natura.

A DQO remanescente no concentrado foi maior quanto maior foi o volume de liciviado evaporado

O valor encontrado de 12.000 mgDQO.L⁻¹ para o concentrado após 50% do volume inicial ter sido evaporado sem acidificação prévia (Figura 5.28), foi duas vezes maior que o valor médio mensurado para a mesma fração de concentrado apresentado na tabela 5.36. Esta diferença pode ser explicada em parte pelo fato de que as concentrações médias para DQO nos lixiviados brutos utilizados para esta etapa estarem 25% maior que a da etapa anterior.

A maior eficiência alcançada por este sistema de bancada ocorreu quando 95% do volume inicial de lixiviado sem acidificação foi evaporado. Para esta condição, o sistema concentrou aproximadamente 96% da DQO em relação ao bruto, em um volume remanescente de apenas 50 mL (5%).

Com relação à evolução da amônia durante os ensaios de evaporação a Figura 5.29 apresenta a evolução da concentração da amônia no condensado após alíquotas serem recolhidas durante os ensaios de evaporação/destilação.

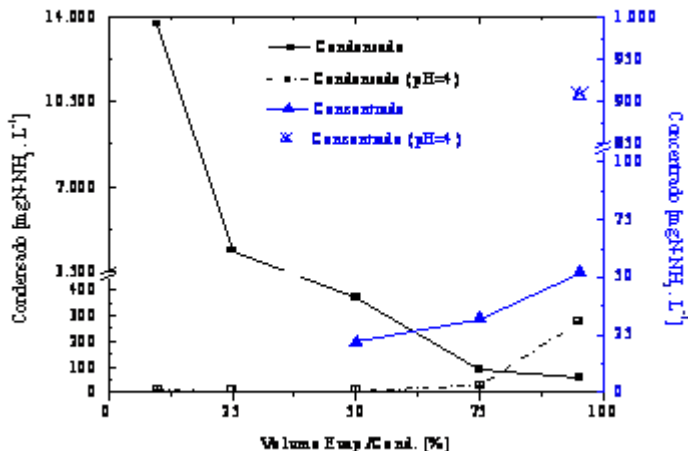


Figura 5.29 - Variação de N-NH₃ [mgN-NH₃.L⁻¹] presente no lixiviado condensado e concentrado em função do volume evaporado [%], com e sem acidificação prévia

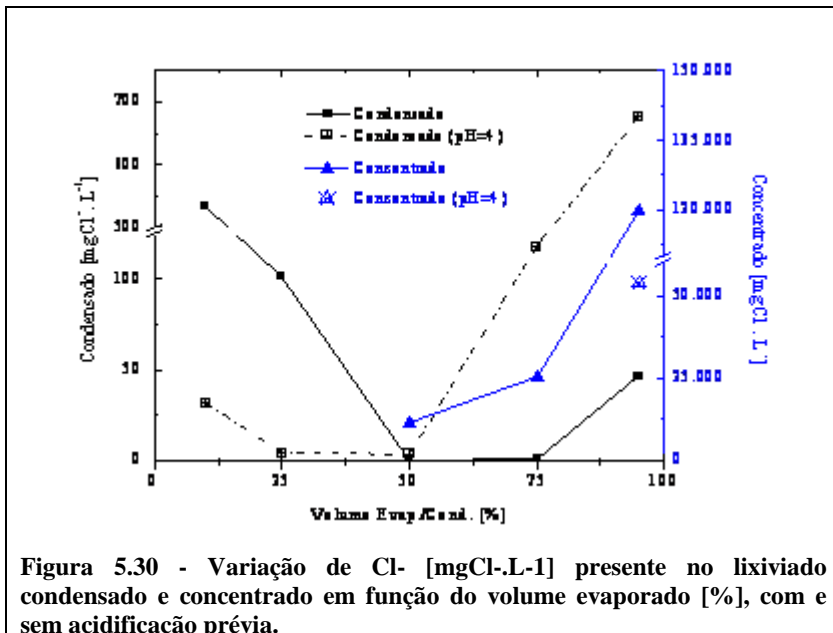
A primeira alíquota do condensado, do lixiviado sem ajuste prévio, apresentou um valor extremamente alto próximo a 14.000 mgN-NH₃.L⁻¹

No decorrer do ensaio observou-se que a concentração de N-NH₃ decresce rapidamente, a N-NH₃ foi carregada em grande parte para o condensado durante a primeira metade do ensaio, por ser uma substância volátil.

A acidificação prévia do lixiviado teve como o principal objetivo impedir o arraste de N-NH₃ para o condensado. Nas análises do condensado com amostras previamente acidificadas os valores de amônia encontrados foram extremamente baixos, exemplificando a eficiência do ajuste de pH citado por diversos autores para impedir a volatilização da amônia.

O concentrado resultante da evaporação do lixiviado previamente acidificado apresenta uma concentração de amônia igual a 900 mgN-NH₃.L⁻¹ após a amostra inicial ter sido evaporada 95% em volume.

Nas análises relacionadas a Cloretos a Figura 5.30 apresenta as concentrações de cloretos durante os ensaios de evaporação.



As concentrações de Cl^- apresentaram valores elevados na fração remanescente (concentrado) da evaporação sem acidificação prévia do lixiviado indicando que a maior parte dos cloretos pode estar na forma de sais, sendo, portanto estáveis à evaporação. O concentrado resultante da evaporação do lixiviado previamente acidificado apresentou altas concentrações de cloretos também, no entanto os valores encontrados estavam bem inferiores ao das amostras não acidificadas.

De forma geral a concentração de Cl^- mensurada no concentrado foi elevada. Por outro lado, o condensado apresentou uma tendência instável, tanto para o lixiviado ajustado como para o in natura.

A concentração dos sólidos remanescentes após a evaporação/destilação do lixiviado é apresentada na Tabela 5.37.

Tabela 5.37 - Fração de sólidos remanescentes da evaporação dos lixiviados

FC [¶]		Lixiviado Bruto			ST			SFT			SVT		
		100 [%]			50 [%]	25 [%]	5 [%]	50 [%]	25 [%]	5 [%]	50 [%]	25 [%]	5 [%]
		ST	SFT	SVT									
n	-	7	7	7	12	3	3	12	3	3	12	3	3
Média	mg.L ⁻¹	10.943	8.882	2.061	21.216	40.188	160.017	17.556	24.983	127.439	3.658	15.205	32.578
Máximo	mg.L ⁻¹	13.001	10.881	2.743	26.603	41.794	184.460	20.873	27.704	134.716	6.073	19.335	49.744
Mínimo	mg.L ⁻¹	8.684	6.939	1.616	16.858	37.100	144.676	13.728	22.334	123.202	2.375	12.190	20.276
σ	-	1.859	1.629	340	3.303	2.675	21.397	2.601	2.686	6.330	1.120	3.701	15.324
Massa ^{¶¶}	mg	10.943	8.910	2.026	10.608	10.047	8.001	8.778	6.246	6.372	1.829	3.801	1.629
FM ^{¶¶¶}	[%]	100	100	100	96,94	91,81	73,11	98,52	70,10	71,51	90,31	187,67	80,42

ST - Sólidos Totais; SFT - Sólidos Fixos Totais; SVT - Sólidos Voláteis Totais

σ - desvio padrão

n - número de ensaios

[¶] Fator de Concentração (em relação ao volume inicial de 1 litro)

^{¶¶} Produto da concentração média pelo volume da amostra (referente ao FC)

^{¶¶¶} Fração de Massa - razão da massa do parâmetro pela massa do bruto

Quanto maior o volume de lixiviado evaporado/destilado, maior as concentrações de ST, SFT e SVT foram mensuradas.

Valores médios para os SVT remanescentes após a evaporação foram encontrados em quantidades maiores que as mensuradas nas evaporações com lixiviado bruto.

5.11.3. Considerações finais

Ao termino do seu trabalho Haddad, 2009 concluiu que:

- A construção do balanço de massa, na primeira etapa de evaporação, para o condensado e concentrado resultantes da evaporação/destilação com metade do volume do lixiviado bruto, indicaram que mais de 90% da fração de massa para DQO e ST, e mais de 80% para COT e Cl- foram retidos no concentrado. Por outro lado, próximo de 96% para N-NH₃ e 70% para CaCO₃ foram efetivamente carregados para o condensado.
- O condensado de N-NH₃ sofreu grande influência do ajuste de pH. Para os ensaios com lixiviado in natura, grande parte foi arrastada nas primeiras alíquotas. Por outro lado, com ajuste de pH prévio, a concentração de N-NH₃ carregada para o condensado foi desprezível. Deste modo, a acidificação prévia do lixiviado bruto mostrou ser bastante eficiente no que tange a retenção da N-NH₃. Porém, a acidificação pode não ser viável economicamente para lixiviados com elevada alcalinidade. Além disso, em meio ácido, os AOV estão presentes na forma de moléculas ao invés de íons, facilitando o carregamento para o condensado. Portanto, a acidificação do lixiviado bruto precisa ser cuidadosamente avaliada em cada caso.
- As concentrações de sólidos remanescentes (ST, SFT e SVT) aumentaram com o aumento do volume de lixiviado evaporado. Valores na ordem de 160 gST.L-1 foram mensurados no concentrado remanescente quando 95% do lixiviado bruto foram efetivamente evaporados, indicando ser um ótimo processo para a remoção de sólidos presentes no lixiviado.

- Os resultados indicaram que a evaporação/destilação foi efetiva no que tange a remoção de DQO, COT, Cl- e ST. Para obter uma boa eficiência de N-NH₃, verificou-se a necessidade de acidificar o lixiviado bruto antes do processo de evaporação, a fim de reter a N-NH₃ no concentrado. Os resultados encontrados nos estudos de Haddad, somados aos estudos prévios de evaporação dos lixiviados não podem isoladamente ser considerados como uma forma plena de tratamento. Portanto, maiores investigações precisam ser realizadas para elucidar a viabilidade da evaporação/destilação como um tratamento.

5.12. Estudo da evaporação como alternativa tecnológica para tratamento de lixiviados de aterros sanitários, Bahe, 2008

Bahe, 2008 em sua dissertação de mestrado realizou evaporações utilizando lixiviados do aterro sanitário de Gramacho, RJ com o uso de um aparato experimental de bancada (Figura 5.31).



Figura 5.31 - Vidrarias e equipamentos utilizados na evaporação de lixiviado.

A vidraria utilizada para evaporar o lixiviado foi composta por um balão de fundo chato de três litros com entrada para termômetro, uma coluna de fracionamento (torre) recheada com anéis de vidro, um condensador de Liebig (condensador de tubo reto), uma unha de destilação, um erlenmeyer, bolas de vidro, suporte universal, garras e mangueiras. Para fornecimento de calor ao sistema foi utilizada uma manta elétrica.

Todos os experimentos de evaporação foram conduzidos em uma capela que tinha a finalidade de proteger o ambiente dos vapores de amônia. Dessa forma a amônia condensada foi recolhida em um banho de gelo a fim de evitar a perda para o ambiente, tendo em vista sua alta volatilidade.

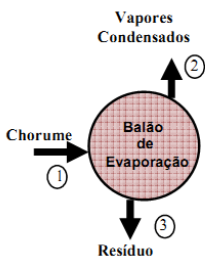
A acidificação do lixiviado foi realizada para reter a amônia no condensado e os testes de evaporação foram realizados uma vez a cada semana sendo realizadas 12 evaporações com lixiviado bruto e duas evaporações com lixiviado acidificado.

Nas evaporações com lixiviado bruto o volume a ser evaporado foi igual a 1,5 litros, a temperatura foi controlada com um termômetro. O teste de evaporação terminava quando o volume de 500 mL de resíduo e 1 litro de condensado.

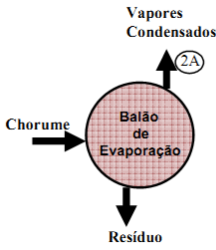
Nas evaporações com amostras previamente acidificadas com ácido sulfúrico (1:1) em pH zero o volume a ser evaporado era igual a 50 mL e o procedimento de evaporação era igual ao procedimento de evaporação com lixiviado bruto.

O fluxograma dos ensaios de evaporação é apresentado a seguir (Figura 5.32 e Figura 5.33)

**Figura 5.32 Evaporação de
lixiviado Bruto**



**Figura 5.33 Evaporação de
lixiviado acidificado**



A caracterização do chorume proveniente do aterro de Gramacho é apresentada na Tabela 5.38.

Tabela 5.38 - Parâmetros físico-químico do chorume de Gramacho

Est.	DQO	DBO	Cloret.	Alcal.	NH ₄	SST	ST	SDT	Cor	Turb.	pH
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	PtCo	FAU	
N.ºDados	10	9	10	10	7	9	9	9	10	10	10,0
Média	3.186	442	4.374	10.860	2.153	51	12.058	12.007	6.161	210	8,5
Mediana	3.224	416	4.518	11.000	2.370	49	12.310	12.283	4.905	182	8,7
Mín.	3.020	302	3.345	9.400	530	14	9.785	9.713	2.870	136	8,1
Máx.	3.360	857	5.603	11.800	2.710	82	18.160	18.078	13.400	390	8,9
DP	141	165	846	650	729	25	2.630	2.630	3.448	69	0,3
CV	4,4%	37,3%	19,3%	6,0%	33,9%	47,7%	21,8%	21,9%	56,0%	32,9%	3,9%

A relação DQO/DBO apresentou-se alta indicando que o lixiviado é proveniente de um aterro sanitário velho (>10anos).

A concentração de cloretos advindo da dissolução de sais mostrou-se extremamente alta. O pH em torno de 8,5 indica a presença de carbonatos e bicarbonatos. A presença de amônia é outro parâmetro bem elevado e os sólidos apresentaram a distribuição na Figura 5.34.

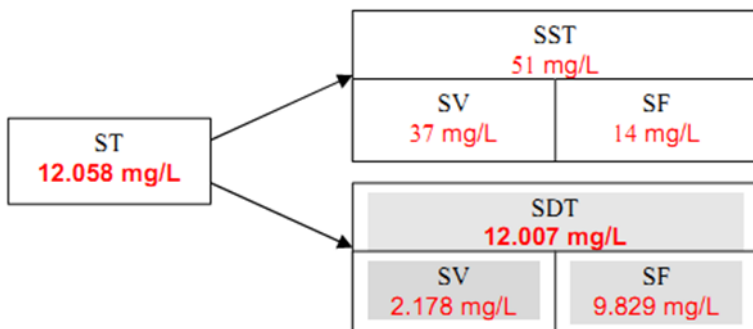


Figura 5.34 - Caracterização dos sólidos presentes no chorume do Aterro de Gramacho

Com a distribuição de sólidos percebe-se que o chorume é praticamente composto de sólidos dissolvidos.

As cores e a turbidez também se fizeram presentes em valores acima da media na litura existente.

5.12.1. Resultados encontrados por Bahe, 2008

Os testes de evaporação com lixiviado bruto sem acidificação reduziram o volume do lixiviado em 70 % do seu volume total e apresentou volumes de condensado e concentrado suficiente para que análises físico químicas pudessem ser feitas.

Tabela 5.39 - Variáveis do processo da evaporação em laboratório

Chorume: 1500 mL			
Condensado: 1000 mL	Média	Máximo	Mínimo
Resíduo: 500 mL			
Temperatura do chorume	21 °C	29 °C	18 °C
Tempo para ebulição	22 min	30 min	15 min
Tempo de Evaporação	6 h	9 h	4 h
Vazão do condensado	166 mL/h	111 mL/h	250 mL/h

A temperatura inicial do lixiviado contribui para a evaporação uma vez que consumiu menos tempo e energia para evaporar o mesmo.

Alguns problemas puderam ser verificados durante a evaporação:

- Formação de espumas
- Refluxo
- Evaporação em saltos

O uso de esferas de vidro dentro do balão de destilação evita a evaporação em saltos e conseqüentemente a perda de material.

As 12 evaporações realizadas no período de 14/03/2007 a 16/08/2007 com 1500 mL de chorume do Aterro de Gramacho, obtiveram 1000 mL de condensado e 500 mL de resíduo em cada evaporação.

O resíduo, concentrado, (Tabela 5.40) e os vapores condensados (Tabela 5.41) foram caracterizados segundo parâmetros físico-químicos, e seus resultados foram apresentados através de estatísticas descritivas

Tabela 5.40 - Parâmetros de caracterização físico-química de 500 mL de resíduo após evaporação

Est.	DQO	DBO	Clor.	Alcal.	NH ₄	SST	ST	SDT	Cor	Turb.	pH
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	PtCo	FAU	
Dados	10	3	7	7	10	5	4	4	9	9	10,0
Média	9.493	465	8.840	6.973	605	3.264	46.168	43.429	19.185	1.013	10,4
Median	10.375	329	9.582	7.400	485	3.010	44.288	42.188	8.740	1.326	10,3
Mín.	3.140	0	3.102	3.800	11	764	22.333	21.569	321	160	9,5
Máx.	17.050	1.067	14.110	9.220	1.680	5.360	73.763	70.753	45.000	2.308	11,3
DP	3.941	546	82	2.179	618	1.915	21.217	20.352	17.068	828	0,7
CV	41,5%	117,4%	0,9%	31,3%	102,1%	58,7%	46,0%	46,9%	89,0%	81,8%	6,3%

Tabela 5.41 - Parâmetros de caracterização físico-química de 1000 mL de condensado após a evaporação.

Est.	DQO	DBO	Cloret.	Alcal.	NH ₄	SST	ST	TDS	Cor	Turb.	pH
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	PtCo	FAU	
Dados	10	7	4	8	7	3	2	2	9	9	10,0
Média	77	15	17	6.582	2.022	16	32	29	17	7	9,4
Mediana	47	13	0	7.688	1.730	5	32		12	1	9,3
Mín.	18	5	0	0	360	1	30	29	5	1	9,0
Máx.	270	28	68	9.600	3.600	43	35	30	37	40	9,8
DP	82	9	34	3.054	1.038	23	3	0	12	13	0,3
CV	106,6%	56,6%	200,0%	46,4%	51,3%	141,9%	10,1%	1,4%	69,2%	191,1%	2,8%

Em 30% do volume total de chorume evaporado, ou seja, cerca de 500 mL, os poluentes (DQO, DBO, sólidos e cloretos) ficaram bastante concentrados, se comparados com a alcalinidade e a amônia.

De acordo com as caracterizações do concentrado e condensado observou-se que o chorume de Gramacho apresentou um alto teor de cloretos. No concentrado, a concentração de cloretos tendeu a aumentar, porque, durante a ebulição, ligações químicas de muitos compostos, onde o cloro está presente, são rompidas e novos cloretos aparecem.

O comportamento da amônia durante a evaporação mostrou-se que a maior parte da concentração, em média 3.481 mg/L, foi transferida para o condensado (vapores da evaporação).

Os compostos responsáveis pela alcalinidade do chorume são os carbonatos e bicarbonatos, e, quando submetidos à evaporação, suas ligações intermoleculares são rompidas e transformados em CO₂. Esses gases, ao serem liberados dentro do próprio líquido, fizeram muita espuma. Ao passo que, quando condensados, reagiram novamente com a água, voltando a suas formas originais e tornando o condensado também alcalino.

No caso da alcalinidade, pôde-se observar um pequeno equilíbrio nas três fases (chorume, resíduo e condensado), levando em consideração que o resíduo poderia ter sido quase totalmente evaporado, se o percentual da evaporação tivesse sido maior que 70%. E, nesse caso, o valor da alcalinidade tenderia a diminuir.

O pH é um parâmetro que apresentou uma sintonia com as três fases, mostrando-se quase uniforme. A presença da alcalinidade ajudou a manter esse pH e o pH de caráter básico ajudou a liberação da amônia para o condensado.

O condensado apesar de possuir caráter incolor, apresentou um forte odor característico da amônia.



Figura 5.35 -Aspecto das amostras de chorume, resíduo e vapores condensados

Concernente as etapas de evaporação ácida os resultados demonstraram que a evaporação do chorume previamente acidificado conseguiu remover a amônia do condensado, apresentando uma eficiência em torno de 99%. Quanto aos AOV, a concentração encontrada foi em média de 64,32 mg/L. (Tabela 5.42)

Tabela 5.42 - Caracterização do condensado em termos de remoção de amônia e concentração

Valores médios		
Chorume	Condensado	
NH ₃ -H	NH ₃ -H	AOV
mg/L	mg/L	mg/L
2.585	15,23	64,32

5.12.2. *Considerações Finais*

O chorume de Gramacho apresenta-se em fase metanogênica.

Os parâmetros DQO, cloretos alcalinidade, amônia, sólidos dissolvidos apresentaram-se altos teores.

Os parâmetros nitrito, nitrato, fósforo e sólido suspensos apresentaram valores muito baixos ou não foram detectados, confirmando o estado avançado de estabilização e a idade do aterro.

A evaporação apresentou ser uma boa opção de pré-tratamento do chorume, porque além de reduzir o volume do efluente a ser tratado, aproveita o gás de aterro como fonte de aquecimento, gerando créditos de carbono.

A evaporação é uma técnica que gera dois subprodutos: os vapores, composto de substâncias leves, e o resíduo do lixiviado não evaporado, composto de substâncias pesadas.

O grande inconveniente da evaporação do lixiviado é a formação de espumas, além de problemas de incrustação e corrosão, gerados pelos sais depositados.

A evaporação de 1500 ml de lixiviado, com 70% de redução, teve um período médio de 6 horas e uma vazão de condensado de 168 mL/mim. A temperatura inicial do lixiviado estava em torno de 21°C.

Observa-se que a evaporação de chorume é eficiente na remoção de carga orgânica (97-94%), porém na remoção de amônia é necessário acidificar o lixiviado

6. DISCUSSÃO

Em quase todos os trabalhos apresentados, com exceção de um único trabalho, Di Palma et al., 2002, os autores relataram que o pH é o parâmetro de maior influencia na qualidade dos subprodutos resultantes da evaporação (concentrado e destilado).

As emissões de amônia e ácidos orgânicos constituíram os parâmetros de maior estudo.

Foi constatado por 11 autores que ajustes de pH nos lixiviados que antecedem a fase de evaporação evitam a transferência de poluentes do estado líquido para o estado gasoso, ou seja, em pH ácido a amônia é impedida de ser volatilizada, no entanto o mesmo não ocorre com os ácidos orgânicos para esta faixa de pH e os mesmo em pH ácido são transferidos para o líquido condensado.

Em destilações básicas a DQO ficou no concentrado e em destilações ácidas a amônia ficou retida no concentrado dessa forma não há existência de um único valor de pH, em lixiviados, onde a amônia e os ácidos orgânicos são impedidos de serem carreados para o destilado simultaneamente.

Dois autores, Birchler e Marks, 1994, sugerem que evaporações com destilados ácidos sejam realizadas em lixiviados que apresentam baixas concentrações de ácidos orgânicos.

Em contrapartida, evaporações com pH básicos devem ser realizadas para lixiviados que apresentam baixas concentrações de amônia.

Nas evaporações de dois estágios em caráter ácido-ácido a amônia ficou retida no concentrado, no entanto a DQO se fez presente no destilado.

As evaporações a vácuo um único autor (Di Palma et al, 2002) relatou que em pH básico o concentrado reteve o COT, DQO e amônia. Os compostos orgânicos voláteis sofreram stripping rapidamente passando para a fase gasosa.

E em evaporações de dois estágios um estágio ácido e outro estágio básico não houve transferência de fase de poluentes uma vez que ambos os poluentes, amônia ácido acético ficaram retidos no concentrado.

As evaporações com lixiviados sem ajuste de pH não obtiveram eficiência no que concerne a amônia e ácidos orgânicos e os mesmos foram carregados para o destilado.

Cerca de dois autores, Xu et al., 2006 e Bahe, 2008 relataram que o destilado com baixa concentração de matéria orgânica, no entanto altas concentrações de nitrogênio amoniacal e além disso Bahe., 2008 relatou que apesar do destilado resultante da evaporação ser incolor o mesmo apresentava forte odor de amônia.

Concernente a necessidade de pré tratamento do lixiviado antes da etapa de evaporação alguns autores utilizaram os seguintes pré tratamentos:

- Ajuste de pH
- Desgaseificação e ajuste de pH
- Filtração, Desgaseificação e ajuste de pH

Os problemas operacionais mais frequentes foram à formação de espumas, incrustações, corrosão, refluxo e evaporação em saltos prejudicando o funcionamento do sistema.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que seja feita análise e comparação de mais parâmetros de cada publicação e que as publicações referentes à evaporação solar sejam incorporadas em novos trabalhos além de comparar os resultados obtidos em evaporações solares com os resultados alcançados nas evaporações forçadas

Além disso sugere-se incorporar em novos trabalhos publicações que englobam a avaliação de compostos orgânicos voláteis resultantes das evaporações de lixiviados de aterros sanitários

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma compilação de 12 publicações que tratam do assunto de evaporação forçada de lixiviados de aterros sanitários foi realizada ao longo deste trabalho, bem como uma análise de cada publicação.

Os principais parâmetros e aspectos levantados por cada autor foi destacado, bem como o tipo de tecnologia, metodologia utilizada e os resultados finais que foram alcançados em cada trabalho.

A amônia e conseqüentemente o ajuste de pH na quase totalidade das publicações constituiu-se o ponto chave de discussão sendo esta por sua vez o parâmetro de maior preocupação ambiental relatado e estudado pelos autores.

Ainda concernente a discussão da amônia e dos poluentes gasosos associados à evaporação, as grandes concentrações da mesma juntamente com grandes concentrações de ácidos orgânicos inviabiliza o uso de evaporações com somente um ajuste de pH, e quando essas duas substâncias se fazem presentes em grandes concentrações a melhor opção constituiu-se a evaporação em dois estágios de ajuste de pH.

De forma ampla a evaporação forçada de lixiviados de aterros sanitários é uma opção tecnológica interessante no que tange a formação de um produto final, concentrado, que pode ser disposto novamente no aterro sanitário; no entanto esta técnica precisa ser melhor ajustada e desenvolvida nos aspectos referente aos poluentes gasosos gerados durante o processo de evaporação.

A técnica de evaporação, como dito na introdução deste trabalho não pode ser utilizada para transferir simplesmente os poluentes da forma líquida para a forma gasosa e maiores estudos ainda precisam ser desenvolvidos para viabilizar o uso desta técnica de forma segura.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVARES Jr., O. M.; LACAVA, C. I. V.; FERNANDES, P. S. **Tecnologias e gestão ambiental** – Emissões atmosféricas. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), 2002. 373p.

ANDRADE, S. M. A. **Caracterização físico-química e tratabilidade por coagulação-floculação dos líquidos percolados gerados no aterro sanitário de Uberlândia-MG**. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU), Uberlândia, 2002.

BIRCHLER, D. R.; MILKE, M. W.; MARKS, A. L.; LUTHY, R. G. **Landfill Leachate Treatment by Evaporation. Journal of Environmental Engineering**, ASC, v. 120, n. 5, 1994.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; ZANTA, V. M.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 278 p.

CHRISTENSEN, T. H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. **Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact**. London: Academic Press Limited, 1989.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P.; BJERG, P. L.; JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, J. B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H. J.; HERON, G. **Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry**, v. 16, n. 7-8, p. 659–718, 2001.

DI PALMA, L.; FERRANTELLI, C. M. et al. **Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis.** Waste Management, v.22, 2002, p.951-955. 2002

ETTALA, M. **Full-Scale Leachate Treatment Using New Evaporation Technology.** Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management, v. 2, n. 2, 1998.

GIRALDO, E. **Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes.** Revista de Ingeniería, Universidad de Los Andes, v. 14, p. 44–55, 2001.

GIUST, E.; VISINTIN, D.; DEL PICCOLO, C. **A combination of cogeneration of evaporation and membrane technique for landfill leachate treatment.** Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy, 2007.

HADDAD, H. S. **Avaliação da qualidade do efluente resultante da evaporação/destilação do lixiviado do Aterro Sanitário Canhanduba, Itajaí/SC.** 2009. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

HERCULE, S.; TARAMINI, V.; SAMAT, P.; GIUST, E.; BIQUILLON, R. **Cogeneration and evaporation: an example of leachate treatment.** Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy, 2005.

MARKS, A. L.; LUTHY, R. G.; DIWEKAR, U. M. **Semi-Continuous Evaporation Model for Leachate Treatment Process Evaluation**. *Environmental Progress*, v.13, n.4, p 278-289, 1994.

MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1995. 521 p.

ÖMAN, C. B.; JUNESTEDT, C. **Chemical characterization of landfill leachates - 400 parameters and compounds**. *Waste Management & Research*, v. 28, n. 10, p. 1876-1891, 2008.

PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M. A. **Microbiology of Solid Waste**, CRC Press, 1996.

PROSAB. (2009). **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitário para as Condições Brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES.

RANZI, Bianca Damo. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. . **Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por evaporação natural com painéis : estudo em escala piloto**. Florianópolis, SC, 2009. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

REHMAN, A. **Landfill leachate treatment using evaporation technology**. 2003. 235 p. Thesis of Master in Environmental Engineering. Carleton University, Ottawa, Ontario, 2003.

ROE, S.; REISMAN, J.; STRAIT, R.; DOORN, M. **Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas**. EPA-600/R-98-021, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. (1998).

SÁ, L. F. **Evaporação natural do lixiviado do aterro da Muribeca através de um destilador solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pernambuco, Recife, PE, 2008.

SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. **Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru**. In: 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS, Porto Alegre, 2000.

SOUTO, G. D. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção de nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (stripping)**. 371 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2009.

VIGNOLI, C. N. **Avaliação da minimização das emissões de amônia no processo de tratamento de chorume por evaporação**. Instituto de Química, UERJ, Rio de Janeiro, 2007. 89 p.

XU, Y-D.; YUE, D-B.; ZHU, Y.; NIE, Y-F. **Fractionation of dissolved organic matter in mature landfill leachate and its recycling by ultrafiltration and evaporation combined processes**. Chemosphere, v. 64, n. 6, p. 903-911, 2006.

YUE, D.; XU, Y.; MAHAR, R. B.; LIU, F.; NIE, Y. **Laboratory-scale experiments applied to the design of a two-stage submerged**

combustion evaporation system. Waste Management & Research, v. 27, n. 5, p. 704-710, 2007.

WISZNIEWSKI, J.; ROBERT, D.; SURMACZ-GORSKA, J.; MIKSCH, K.; WEBER, J.V. **Landfill Leachate Treatment Methods: A Review.** *Environ. Chem. Lett.* Vol. 4: 51–61, 2006.